



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

공동주택의 실내외 미세먼지
환경조건을 고려한
Ventilation과 Filtration 제어 전략
**Ventilation and Filtration Control Strategy considering
Indoor and Outdoor Particle Environmental Conditions of
Apartment Building**

2018 年 2月

서울대학교 대학원

건축학과

김 지 혜

국 문 초 록

실내 공기질 문제가 대두 되면서 신축 공동주택에 환기장치 설비가 의무화되고, 최근 미세먼지 문제가 급부상하면서 실내 공기청정기의 보급률이 확대되고 있다. 시스템의 보급은 보편화되고 있으나 실내 미세먼지와 전반적인 실내 공기질을 관리하기 위해 두 시스템을 효율적으로 운영할 수 있는 제어방안은 아직까지 미비하다. 실내 미세먼지 관리를 위한 환기는 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생 정도에 따라 유리하기도 하고, 불리 할 수도 있다. 환기가 유리한 경우에는 목표농도를 만족시키기 위해 필요한 환기량과 함께 추가적인 공기청정기의 운전이 필요한지 판단하여 제어량을 결정하고, 환기가 불리한 경우에는 기타 실내에서 발생하는 오염물질을 고려한 최소 환기량 확보 및 미세먼지 제어를 위한 공기청정기의 운전이 필요하다. 따라서, 계속적으로 변화하는 미세먼지 환경조건에서 환기가 유리한 환경과 불리한 환경을 판단하여 Ventilation과 Filtration의 제어 모드와 제어량을 결정할 수 있는 제어 전략이 필요하다.

이를 위하여 실내외 미세먼지 환경조건을 판단할 수 있도록 실내 미세먼지 농도해석모델과 이를 기반으로 한 실내 미세먼지 발생 예측 모델을 구축하였다. 구축된 모델로 시뮬레이션을 통해 환경조건과 제어관련 영향인자의 변화에 따른 실내농도 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 환경조건에 따라 목표농도를 만족시키기 위한 제어모드와 제어량을 결정할 수 있는 Control limit 커브 (CL 커브)를 도출하였다. CL 커브를 활용하여 미세먼지의 실내 목표 농도를 만족시키고 전반적인 실내 공기질과 에너지를 고려한 Ventilation과 Filtration 제어 전략을 제시하고, 제어의 적용 효과를 평가하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내 미세먼지 농도는 영향을 미치는 여러 환경조건 인자 중 특히, 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생율의 영향을 크게 받는다. 실내 미세먼지 농도 개선을 위해 **Ventilation** 제어를 적용하는 경우, 환기풍량이 작을 때는 외기 도입량이 작아 필터효율의 영향이 크지 않다. 그러나 환기풍량이 클 때 저효율 필터의 적용은 실외 미세먼지 농도가 높아짐에 따라 실내 농도를 급격히 증가시킬 수 있기 때문에 중효율 등급 이상의 필터 적용이 요구된다. **Filtration** 제어의 경우, 필터효율이 클수록 풍량 증가에 따른 실내 미세먼지 농도 개선 효과가 더 커지므로 고효율 필터 적용이 유리하다.
- (2) 계속해서 변화하는 실외 미세먼지 농도를 측정하고, 실내 미세먼지 발생율을 예측하여 **Ventilation**과 **Filtration** 제어 모드와 제어량을 결정할 수 있는 제어 전략을 제시하였다. 이를 적용하면, 실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율도 높은 환경조건에서 기존 제어와 비교하여 유사한 실내 미세먼지 농도를 유지하고 비슷한 팬동력을 사용하면서 실내 발생 오염물질 관리에는 유리하였다. 실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율이 낮을 때는 상대적인 실내 미세먼지 농도는 높았으나 미세먼지 실내 목표농도 이하 유지는 가능하였고, 실내 발생 오염물질 관리에 유리하며 팬동력을 적게 사용하였다. 실외 미세먼지 농도는 낮고, 실내 미세먼지 발생율은 높은 환경조건에서는 팬동력은 상대적으로 많이 사용하지만 실내 미세먼지 농도 경감에 유리하였다. 실외 미세먼지 농도도 낮고, 실내 미세먼지 발생율도 낮을 때는 상대적으로 적은 팬동력을 사용하면서 유사한 수준으로 실내 미세먼지 농도 및 실내 발생 오염물질 관리를

할 수 있다.

주요어 : 실내 미세먼지 환경조건, 실외 미세먼지 환경조건, Ventilation 제어, Filtration 제어, Control limit(CL) 커브, 공동주택

학 번 : 2007-30796

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	5
제 2 장 실내 미세먼지 제어를 위한 예비적 고찰	10
2.1 실내 미세먼지 농도 형성 개요	11
2.1.1 미세먼지의 특성	11
2.1.2 실내 미세먼지의 농도 형성 메커니즘	16
2.1.3 실내 미세먼지 농도 형성 영향인자	19
2.2 실내 미세먼지 평가방법	29
2.2.1 측정에 의한 평가	29
2.2.2 모델링에 의한 평가	30
2.3 Ventilation과 Filtration 제어 관련 기존 연구	38
2.3.1 Prescribed ventilation과 filtration 제어연구	38
2.3.2 환경 대응형 ventilation과 filtration 제어연구	40
2.4 소 결	45

제 3 장	실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 해석모델	47
3.1	실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 해석이론	48
3.1.1	실내 미세먼지 농도 해석이론	48
3.1.2	실내 미세먼지 발생 예측 해석이론	55
3.2	영향인자 도출 및 해석모델 구축	57
3.3	현장실험을 통한 해석모델 검증	59
3.3.1	해석모델의 계수 추정	61
3.3.2	실내 미세먼지 농도 해석부의 검증	68
3.3.3	실내 미세먼지 발생 예측 해석부의 검증	74
3.4	소 결	76
제 4 장	주요 영향인자 변화에 따른 실내 미세먼지 농도특성	77
4.1	주요 영향인자 선정 및 평가범위 결정	78
4.1.1	주요 영향인자의 선정	78
4.1.2	주요 영향인자의 평가범위	83
4.2	주요 영향인자 변화에 따른 실내 농도특성	86
4.2.1	환경조건 영향인자의 변화에 따른 특성	86
4.2.2	Ventilation 제어관련 영향인자의 변화에 따른 특성	89
4.2.3	Filtration 제어관련 영향인자의 변화에 따른 특성	96
4.3	소 결	100

제 5 장 Ventilation과 Filtration에 의한 실내 미세먼지 제어 전략 103

5.1	실내 미세먼지 제어 개념	104
5.1.1	환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어 개념	106
5.1.2	Control limit (CL) 커브를 활용한 제어 개념	110
5.2	Ventilation과 Filtration 제어모드와 제어량 결정방법	121
5.2.1	환경조건 파악 (Step 1 & 2)	122
5.2.2	환경조건 별 제어모드와 제어량 결정방법 (Step 3)...	126
5.3	Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘 도출 및 적용	132
5.3.1	Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘 도출	132
5.3.2	Ventilation과 Filtration 제어의 적용	136
5.4	소 결	143

제 6 장 시뮬레이션을 통한 제어 전략 적용효과 평가 145

6.1	평가 개요	146
6.1.1	평가 요소	146
6.1.2	평가 모델	149
6.2	평가 케이스	154
6.2.1	환경조건 케이스	154
6.2.2	시스템 및 제어 케이스	156
6.3	평가 결과	160
6.3.1	환경조건 E1에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교	160
6.3.2	환경조건 E2에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교	163

6.3.3	환경조건 E3에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교	166
6.4	소 결	169
제 7 장	결 론	173
참 고 문 헌	181

표 목 차

Table 2.1 Role of each model in indoor particle concentration evaluation.....	15
Table 2.2 Filter performance classification by EN 779 and EN 1882.....	28
Table 2.3 Filter performance classification by ASHRAE 52.2.....	28
Table 2.4 Role of each model in indoor particle concentration evaluation.....	32
Table 2.5 Precedent studies: What is considered for control of indoor particle concentration	44
Table 3.1 Description of a test room	59
Table 3.2 Results of estimating building parameters P and k	67
Table 3.3 Results of estimating system parameters η_v and η_f	68
Table 3.4 Input values of simulation model obtained by measurements.....	70
Table 3.5 Results of indoor source generation rate.....	75
Table 4.1 Level of factors predicted to influence on indoor particle concentration	80
Table 4.2 Selected influence parameters on indoor particle concentration.....	82
Table 4.3 Ranges of selected parameters	85
Table 4.4 Simulation cases for analyzing the influence of environmental parameters	86
Table 4.5 Simulation cases for analyzing the influence of ventilation control related parameters	89
Table 4.6 Influence of Q_v , η_v on indoor particle concentrations	91
Table 4.7 Meaning of change in slope and distance of iso-indoor concentration lines	93
Table 4.8 Simulation cases for analyzing the influence of filtration control related parameters	96

Table 4.9 Influence of Q_f , η_f on indoor particle concentrations	98
Table 5.1 Control direction of each environmental condition zone in CL curve..	119
Table 5.2 Formulas of three control limits in CL curve.....	124
Table 5.3 Discriminating equation for finding out where CP belongs	125
Table 6.1 Evaluation parameters	146
Table 6.2 Parameters related to space.....	150
Table 6.3 Parameters related to system	150
Table 6.4 Simulation cases for evaluating the effect of control application.....	159

그림 목 차

Fig. 1.1 Research process and method.....	9
Fig. 2.1 Sizes of indoor particles	12
Fig. 2.2 Particle characteristics according to particle diameter	13
Fig. 2.3 Mechanism of indoor particle concentration	16
Fig. 2.4 Comparison of penetration coefficient as a function of particle size	20
Fig. 2.5 Comparison of deposition rate as a function of particle size	22
Fig. 2.6 Diameter range of particles generated from each indoor source	25
Fig. 2.7 Indoor particle model according to indoor source consideration	31
Fig. 2.8 Indoor particle model according to previous time consideration	31
Fig. 2.9 Indoor particle model types	32
Fig. 2.10 Estimation penetration coefficient and deposition rate using Steady & Non- source model	34
Fig. 2.11 Indoor particle concentration simulated for static mode (a) outdoor concentration >> indoor concentration and (b) outdoor concentration << indoor concentration.....	39
Fig. 2.12 Optimum ventilation level to control pollutants which are one is from outdoor sources and the other is from indoor sources	41
Fig. 3.1 Parameters of indoor particle concentration.....	58
Fig. 3.2 Validation process of the simulation model	60
Fig. 3.3 Measurement of indoor, outdoor particle concentration and air exchange rate	62
Fig. 3.4 An example of indoor and outdoor particle concentration for estimating parameter P and k	64

Fig. 3.5 Typical particle natural decay curve for estimating deposition rate (k)	64
Fig. 3.6 Measurement of filter efficiency of ventilation system	65
Fig. 3.7 Measurement of filter efficiency of filtration system	66
Fig. 3.8 Frequency distribution of infiltration rate during test periods	70
Fig. 3.9 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 1 of ventilation system	71
Fig. 3.10 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 2 of ventilation system	71
Fig. 3.11 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 3 of ventilation system	72
Fig. 3.12 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 1 of filtration system	72
Fig. 3.13 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 2 of filtration system	73
Fig. 3.14 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 3 of filtration system	73
Fig. 3.15 Diameter range of particles generated from burning candle	75
Fig. 4.1 Categorization of parameters related to indoor particle concentration	79
Fig. 4.2 Normal plot of the effects on response variable	81
Fig. 4.3 Main effects plot for indoor concentration	81
Fig. 4.4 Influence of C_{out} , G on indoor particle concentrations	88
Fig. 4.5 Indoor particle concentrations under ventilation control with $Q_v=400m^3/h$ and $\eta_v=0.65$	90
Fig. 5.1 Objective of ventilation and filtration control	105

Fig. 5.2 Concept of control strategy (Penetration \ll Generation).....	106
Fig. 5.3 Concept of control strategy (Penetration \gg Generation).....	107
Fig. 5.4 Concept of control strategy (Penetration \approx Generation).....	108
Fig. 5.5 Concept of control strategy considering environmental conditions	109
Fig. 5.6 Iso-lines of indoor concentration ($= 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) which ventilation flow rates change from 100 to 600 m^3/h ($\eta_v = 0.65$).....	114
Fig. 5.7 Iso-lines of indoor concentration ($= 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) which filtration flow rates change from 100 to 600 m^3/h ($\eta_v = 0.95$)	115
Fig. 5.8 Control limit (CL) curve.....	116
Fig. 5.9 Concept of control strategy with specified environmental conditions using control limit (CL) curve.....	120
Fig. 5.10 Process for determination of control mode and flow rate of system.....	121
Fig. 5.11 Concept of finding out where an arbitrary point belongs	123
Fig. 5.12 Concept of 2 points method for obtaining $Q_{v,req}$	127
Fig. 5.13 Concept of slop & 1 point method for obtaining $Q_{f,req}$	130
Fig. 5.14 Ventilation and filtration control process for managing indoor particle concentration	135
Fig. 5.15 System set-up for condition zone control	137
Fig. 5.16 Application process of control strategies.....	141
Fig. 5.17 Data flow of control stage	142
Fig. 6.1 Schematic diagram of indoor space equipped with the ventilation and filtration system and model parameters.....	149
Fig. 6.2 Concept of data flow.....	152
Fig. 6.3 Comparison between measured data and predicted data during ventilation	

control.....	153
Fig. 6.4 Comparison between measured data and predicted data during filtration control.....	153
Fig. 6.5 Outdoor condition cases	155
Fig. 6.6 Indoor condition case	155
Fig. 6.7 Schematic system and control diagram of Case S1-C1	157
Fig. 6.8 Schematic system and control diagram of Case S1-C2	157
Fig. 6.9 Schematic system and control diagram of Case S2-C2	158
Fig. 6.10 Modified CL curve and condition zones for Case S2-C2	158
Fig. 6.11 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO ₂ concentrations, and fan power during E1	161
Fig. 6.12 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO ₂ concentrations, and fan power during E2	164
Fig. 6.13 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO ₂ concentrations, and fan power during E3	167
Fig. 6.14 Effects when Condition zone control is adopted under 4 different conditions	168

약 어 설 명

ABBREVIATION	MEANING
PM	Particulate matter
CADR	Clean air delivery rate
MERV	Minimum efficiency rating value
CL	Control limit
CP	Condition point
IP	Intersecting point

기 호 설 명

SYMBOL	MEANING	UNIT
C_{in}	Indoor particle concentration	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
C_{in}^i	Indoor particle concentration at time step i	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
C_{out}	Outdoor particle concentration	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
C_{out}^i	Outdoor particle concentration at time step i	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_{in,ini}$	Indoor particle concentration at time 0	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_{in,ss}$	Indoor particle concentration at steady state	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
$C_{in,t}$	Target indoor concentration	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
C_{floor}	Floor loading	$\mu\text{g}/\text{m}^2$
G	Indoor generation rate	$\mu\text{g}/\text{h}$
G_i	Generation rate of source i	$\mu\text{g}/\text{h}$
G_{others}	Generation rate from all other indoor sources	$\mu\text{g}/\text{h}$
λ	Infiltration/Exfiltration rate	h^{-1}
P	Penetration coefficient	-
P_t	Total penetration coefficient	-
P_g	Penetration coefficient due to gravitational settling	-
P_d	Penetration coefficient through a crack considering Brownian diffusion	-
P_i	Penetration coefficient associated with impaction	-
k	Deposition rate	h^{-1}

SYMBOL	MEANING	UNIT
V_d	Deposition velocity	m/s
A	Deposition area	m^2
r_a	Aerodynamic resistance	s/m
r_s	Surface resistance	s/m
U_*	Friction velocity	m/s
V	Room volume	m^3
F_{INF}	Infiltration factor	-
I/O	Indoor/Outdoor ratio	-
C_{ig}	Concentration of particles generated indoors	$\mu g/m^3$
T_i	Time period during which source i was activated	h
t	Time	h
D	Particle diffusion coefficient	m^2/s
l	Crack length	m
h	Crack height	m
V_s	Particle settling velocity	m/s
U_m	Mean air speed in the crack	m/s
Stk	Stokes number	-
ρ_p	Particle density	kg/m^3
d_p	Particle diameter	m
C_c	Cunningham coefficient	-
μ	Molecular dynamic viscosity of air	$kg \cdot s/m$
η_v	Particle removal efficiency of the ventilation system	-
η_f	Particle removal efficiency of the filtration system	-
Q_v	Ventilation airflow rate	m^3/h
$Q_{v,min}$	Minimum ventilation airflow rate	m^3/h
$Q_{v,max}$	Maximum ventilation airflow rate	m^3/h
$Q_{v,req}$	Required ventilation flow rate	m^3/h
Q_f	Filtration airflow rate	m^3/h
$Q_{f,max}$	Maximum filtration airflow rate	m^3/h
$Q_{f,req}$	Required filtration flow rate	m^3/h
r	Resuspension rate	h^{-1}

SYMBOL	MEANING	UNIT
A_r	Resuspension surface area	m^2
$C_{outlet,vent}$	Particle concentration on the outlet of ventilation system	$\mu g/m^3$
$C_{inlet,vent}$	Particle concentration on the inlet of ventilation system	$\mu g/m^3$
$C_{outlet,filt}$	Particle concentration on the outlet of filtration system	$\mu g/m^3$
$C_{inlet,filt}$	Particle concentration on the inlet of filtration system	$\mu g/m^3$
W_{tot}	Total fan power	W
$W_{v,req}$	Fan power of ventilation system	W
$W_{f,req}$	Fan power of filtration system	W
ΔP_v	Pressure drop of ventilation system	Pa
ΔP_f	Pressure drop of filtration system	Pa
$F_{v,eff}$	Ventilation fan efficiency	-
$F_{f,eff}$	Filtration fan efficiency	-
E_{tot}	Total fan energy	Wh
$E_{v,req}$	Fan energy of ventilation system	Wh
$E_{f,req}$	Fan energy of filtration system	Wh
T_v	Ventilation fan operating time	h
T_f	Filtration fan operating time	h
C_{in,CO_2}	Indoor CO ₂ concentration	ppm
C_{out,CO_2}	Outdoor CO ₂ concentration	ppm
G_p	Metabolic CO ₂ generation rate per person	l/s
RQ	Respiratory quotient	-
A_D	Dubois surface area	m^2
M	Level of physical activity	met
H	Body height	m
W	Body weight	kg

제 1 장 서 론

- 1.1 연구의 배경 및 목적
 - 1.2 연구의 범위 및 방법
-

1.1 연구의 배경 및 목적

미세먼지는 입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 먼지를 통상적으로 일컫는 말이다. 미세먼지의 성분 중에는 중금속과 같이 체내에 축적되면 장기간에 걸쳐 부작용을 나타내는 물질도 있고, 입경의 크기에 따라 폐포나 혈관까지 침투할 수 있어 호흡기질환, 심장질환, 뇌졸중, 암 등의 질병의 원인이 되는 등 인체에 대한 위해도가 크다.^{1,2,3,4}

우리나라의 경우, 압축 성장에 의한 급속한 공업화, 산업화, 도시 집중

-
- 1 Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B and Herbarth O. The effect of particle size on cardiovascular disorders — The smaller the worse. Sci. Total Environ. 2011;409:4217–4221.
 - 2 Kim K, Kabir E and Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environ. Int. 2015;74:136–143.
 - 3 Shah ASV, Lee KK, Mcallister DA, Hunter A, Nair H, Whiteley W, Langlish JP, Newby DE and Mills NL. Short term exposure to air pollution and stroke : systematic review and meta-analysis. Brit. Med. J. 2015;350:h1295.
 - 4 Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B and Brunekreef B. Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review. Environ. Health. 2013;12:43.

화로 인하여 국내에서 발생하는 미세먼지의 양이 많을 것으로 예상된다. 뿐만 아니라, 미세먼지의 대기 농도가 심각한 중국과도 지리적으로 인접해있어 편서풍의 영향을 받는 계절에는 중국대륙에서 발생한 미세먼지의 이동에 큰 영향을 받는다.⁵ 따라서 국내에서 발생한 미세먼지와 중국 미세먼지의 영향으로 우리나라 대기의 미세먼지가 심각한 수준인 것으로 파악된다.

이와 같은 심각한 수준의 실외 미세먼지는 실내 미세먼지 농도에도 악영향을 줄 수 있다. 미세먼지 농도가 높은 외기가 건물의 다양한 공기 이동경로를 통해 실내로 유입되는 침투(Penetration)과정을 통해 실내 미세먼지 농도를 높일 수 있기 때문이다.⁶ 또한, 실내 미세먼지 농도는 실내 발생(Indoor generation)에 의해서도 증가할 수 있다. 실내에서의 조리, 흡연, 청소, 거주자의 움직임 등 거주자가 실내에서 행하는 모든 행위에서 미세먼지가 발생된다.^{7,8,9,10,11} 즉, 실내 미세먼지 농도를 증가시키는 원인은 실의 외부와 내부 모두에 존재한다.

5 신동천. 미세먼지의 건강영향. 대한의사협회지. 2007;175-182.

6 Nazaroff W. Indoor particle dynamics. Indoor air. 2004;14:175-183.

7 Afshari A, Matson U and Ekberg LE. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. Indoor Air 2005;15:141-150.

8 Ferro AR, Kopperud RJ and Hildemann LM. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. Environ. Sci. Technol. 2004;38:1759-1764.

9 Urso P, Cattaneo A, Garramone G, Peruzzo C, Cavallo DM and Carrer P. Identification of particulate matter determinants in residential homes. Build. Environ. 2015;86:61-69.

10 Long CM, Suh HH and Koutrakis P. Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. J. Air Waste Manage. Assoc. 2000;50:1236-1250.

11 Jamriska M, Morawska L, Ensor D. Control strategies for sub-micrometer particles indoors : model study of air filtration and ventilation. Indoor air. 2003;96-105.

이상의 실외 미세먼지 침투 또는 실내 미세먼지 발생에 의해 높아진 실내 미세먼지의 농도를 개선시키기 위해서 Ventilation에 의한 희석제어와 Filtration에 의한 제거제어 방안이 현재 가장 일반적으로 적용되고 있다. Ventilation 제어는 실내보다 농도가 낮은 외기를 실내로 들여 희석에 의해 실내 농도를 개선시키는 방법이고, Filtration 제어는 오염된 실내공기를 필터에 통과시켜서 공기에 있는 미세먼지를 제거하고, 걸러진 공기를 다시 실내로 재순환시킴으로써 실내 농도를 개선시키는 방법이다. Ventilation에 의한 제어는 실내에서 발생하는 다른 오염물질의 농도를 함께 개선시킬 수 있어 실내의 전반적인 실내공기질에 유리한 방법이지만, 실외 미세먼지 농도가 높은 조건에서는 외기 도입에 의해 실내 미세먼지 농도가 오히려 증가될 수 있다.¹² Filtration에 의한 제어는 실외에서 유입된 미세먼지와 실내에서 발생한 미세먼지를 함께 제거할 수 있기 때문에 실외 미세먼지 농도가 높아 환기가 어려운 조건에서 대안이 될 수 있다. 그러나 외기 도입없이 실내공기를 재순환하기 때문에 미세먼지 이외에 전반적인 실내공기질 개선에는 한계가 있다. 또한, Filtration 제어의 효과를 높이기 위해서는 CADR(Clean air delivery rate)이 큰 공기청정기의 적용이 요구되며 이는 에너지 사용량 증가로 이어질 수 있다. 따라서 Filtration에 의한 제어는 Ventilation에 의한 제어가 불리한 환경조건에서 보완적 장치로 운영될 필요가 있다.

12 Jamriska M, Morawska L, Ensor D. Control strategies for sub-micrometer particles indoors : model study of air filtration and ventilation. Indoor air. 2003;96-105.

우리나라는 2006년 1월 이후 건축허가가 동의된 100세대 이상 공동주택의 경우 환기 설비 적용이 의무화되어¹³ 이 시기에 시공된 공동주택은 환기시스템 보급률이 100%에 가깝다. 포터블 공기청정기도 가정내 보급률이 2015년 기준 20%이며, 미세먼지 악화로 판매량이 급증하고 있어 보급률이 지속적으로 증가할 것으로 판단된다.¹⁴

그러나 지속적인 시스템 보급률 확대에 비하여 실내 미세먼지 제어를 위해 두 시스템을 효과적으로 운영하기 위한 제어방안은 부재하다. 앞서 기술한 바와 같이, 미세먼지는 실내 농도 증가의 원인이 실외와 실내 모두에 존재하기 때문에 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 오염된 실내 공기를 희석시키기 위하여 환기량을 늘리는 것이 유리한 조건도 있고, 실외 미세먼지의 유입을 차단시키기 위하여 환기량을 줄이는 것이 유리한 조건도 있다. 따라서, 변화하는 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 Ventilation 제어 적용의 유불리 판단을 통해 Ventilation과 Filtration의 모드 선택 방안을 제시하는 것이 실내 미세먼지 농도를 효과적으로 제어하기 위해 반드시 고려되어야 한다.

한편, Ventilation 유불리 판단을 통해 환기량을 늘리거나 줄이게 되면 실내 미세먼지 농도 이외에도 기타 실내에서 주로 발생하는 다른 오염물질의 농도와 에너지 비용 등에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어, 환기량을 늘리면 에너지 비용이 증가하고, 환기량을 줄이면 기타 실내 발생 오염

13 국토교통부, 2017. 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 일부개정령안.

14 박찬정, 공기청정기 시장 및 기술동향, 건축환경설비, Vol.10 No.1, 2016;7-11.

물질의 농도가 증가될 위험이 있다. 따라서, 제어량을 결정하기 위해서는 풍량에 따라 영향 받을 수 있는 여러가지 요소를 함께 고려하여 미세먼지 제어에 따른 부정적 영향을 최소화 하려는 노력이 필요하다.

본 연구의 목적은 계속적으로 변화하는 실내·외 미세먼지 환경조건에 따라 실내 농도를 목표 농도 이하로 유지시키는 동시에 실내 미세먼지 제어 시 발생할 수 있는 에너지 소비 및 전반적인 실내공기질 문제를 고려하여 제어모드와 제어량을 결정할 수 있도록 Ventilation과 Filtration 제어전략을 제시하는 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 실내에서 이루어지는 거주자의 행동이 다양하여 실내 미세먼지 발생율의 변화폭이 크고, 사람들이 장시간 거주하는 주거 건물을 대상으로 하였으며, 국내 주거 건물의 대표적인 형태라고 할 수 있는 공동주택을 대상 건물로 정하였다.

제어대상 오염물질인 미세먼지는 다양한 입자의 혼합물로 수많은 입경과 형태 및 성분 등으로 구성된다. 이 중 입경은 입자들의 물리적 특성과 인체 위해도 뿐 아니라 제어기술에 영향을 주기 때문에 매우 중요한 속성이다. 미세먼지 입경 크기 $10\mu\text{m}$ 이하를 PM_{10} , $2.5\mu\text{m}$ 이하를 $\text{PM}_{2.5}$ 로 분류하고 있으며, 대부분의 국가에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 대기질 관리대상으로 농도를 규제하고 있다. 이 중 입경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지의 경우, $2.5\mu\text{m}$ 이상의 미세먼지에 비해 인체 위해도가 더 높고, 실내로 쉽게 침투

하며, 필터에 의해 잘 걸러지지 않아 더욱 세심한 관리가 필요하다. 또한, $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지를 포집할 수 있는 필터는 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 미세먼지에 대해서는 포집 효율이 매우 높기 때문에 본 연구에서는 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하인 $\text{PM}_{2.5}$ 를 주요 대상 오염물질로 정하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 실내 농도는 실내 발생원의 위치 또는 실내 기류 상태에 따라 공간별로 농도 분포가 달라질 수 있으나 해석의 간편성 및 제어의 편의성을 위해 실내 공기가 Well-mixed 되어 실내 모든 공간에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도가 동일하다고 가정하였다.

본 연구에서 Ventilation 제어는 전열교환 환기장치의 급기측 필터를 포함하여 환기 시스템 전체를 통해 실내와 실외의 미세먼지가 교환되는 과정으로 규정하였다. Filtration 제어는 환기 시스템에 통합된 별도의 실내 순환 유로에 설치된 리턴측 필터 또는 독립된 형태로 실내에 설치된 포터블 공기청정기의 필터를 통해 실내 공기의 미세먼지를 제거한 후 깨끗해진 공기를 다시 실내로 재순환시키는 과정으로 규정하였다.

본 연구의 범위 및 방법을 요약하면 다음과 같다.

(1) 실내 미세먼지 농도 영향 평가를 위한 고찰

기존 연구문헌을 통해 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘과 관련 영향인자를 고찰하여, 주요 영향인자 도출의 근거를 마련했다. 기존의 측정과 모델링을 통해 실내 농도를 평가하는 방법들을 고찰하고 실내 미세먼지 농도 영향 평가를 위한 해석모델 구축의 이론적 배경으로 삼았다. 실내

미세먼지 농도 개선을 위한 Ventilation 제어와 Filtration 제어와 관련된 기존 연구를 고찰함으로써 본 연구의 필요성을 확인하고 상세 연구내용을 설정하였다.

(2) 실내 미세먼지 농도 및 발생 해석모델 구축 및 검증

Ventilation 제어와 Filtration 제어가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 실내 미세먼지 농도 및 발생 해석에 대한 관련 이론들을 고찰하고 모델을 구축하였다. 구축된 해석모델의 검증을 위하여 공동주택에서 전열교환 환기장치를 통한 Ventilation 제어와 포터블 공기청정기를 통한 Filtration 제어 실험을 진행하였다. 검증 실험에 앞서 계수 획득 실험을 진행하여 모델에 필요한 계수들의 실질 값을 획득하고, 실험에 의해 측정된 미세먼지 농도값과 모델을 이용하여 계산된 값을 비교함으로써 미세먼지 농도 해석부를 검증하였다. 아울러, 미세먼지 농도 해석모델을 바탕으로한 실내 발생량 예측 모델의 신뢰성을 확보하기 위하여 실내에서 동일한 발생 실험을 수회 반복하면서 실내 농도 측정값을 바탕으로 예측된 발생량 값들이 서로 유사한지 비교하였다.

(3) 영향인자 변화에 따른 실내 미세먼지 농도특성 평가

주어진 환경조건과 제어된 시스템조건에 따라 결정되는 실내 미세먼지 농도를 평가하기 위해 환경조건 영향인자와 제어관련 영향인자로 분류하였다. 환경조건 영향인자는 실내 농도에 대한 인자의 영향도 분석을 통해 영향이 큰 인자를 추린 후, 제어관련 영향인자와 함께 주요 영향인자

로 선정하였다. 주요 영향인자는 기존 자료의 고찰을 통해 실제 환경에서 변화할 수 있는 값의 범위를 평가의 범위로 설정하여 시뮬레이션 케이스를 구성하고, 주요 영향인자 변화에 따른 실내 미세먼지 농도특성 파악을 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

(4) 실내외 미세먼지 환경조건을 고려한 실내 미세먼지 제어전략 도출 및 적용

침투 및 실내 발생 조건에 따른 Ventilation과 Filtration의 실내 미세먼지 농도 제어 효과를 분석한 내용을 바탕으로 실내·외 미세먼지 환경조건에 따라 효과적인 제어모드와 제어량을 결정할 수 있는 커브를 제시하고, 이를 바탕으로 제어 알고리즘을 도출하였다. 본 연구에서 제안한 제어를 실제 공간에 적용하고자 할 때 도움이 될 수 있도록 가능한 시스템의 구성을 제시하고 제어의 적용을 위한 프로세스를 정립하였다.

(5) 실내 미세먼지 제어 적용 효과 평가

도출된 Ventilation과 Filtration 제어 전략의 적용 효과를 평가하기 위하여 시뮬레이션을 작성하였다. 실내·외 미세먼지 환경조건과 시스템 및 제어방식에 따라 평가 케이스를 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 본 연구에서 제안된 제어의 실내 미세먼지 농도 및 기타 실내 발생 오염물질 관리, 에너지 절감 효과를 입증하였다.

이상과 같은 연구 진행을 연구 흐름도로 나타내면 Fig.1.1과 같다.

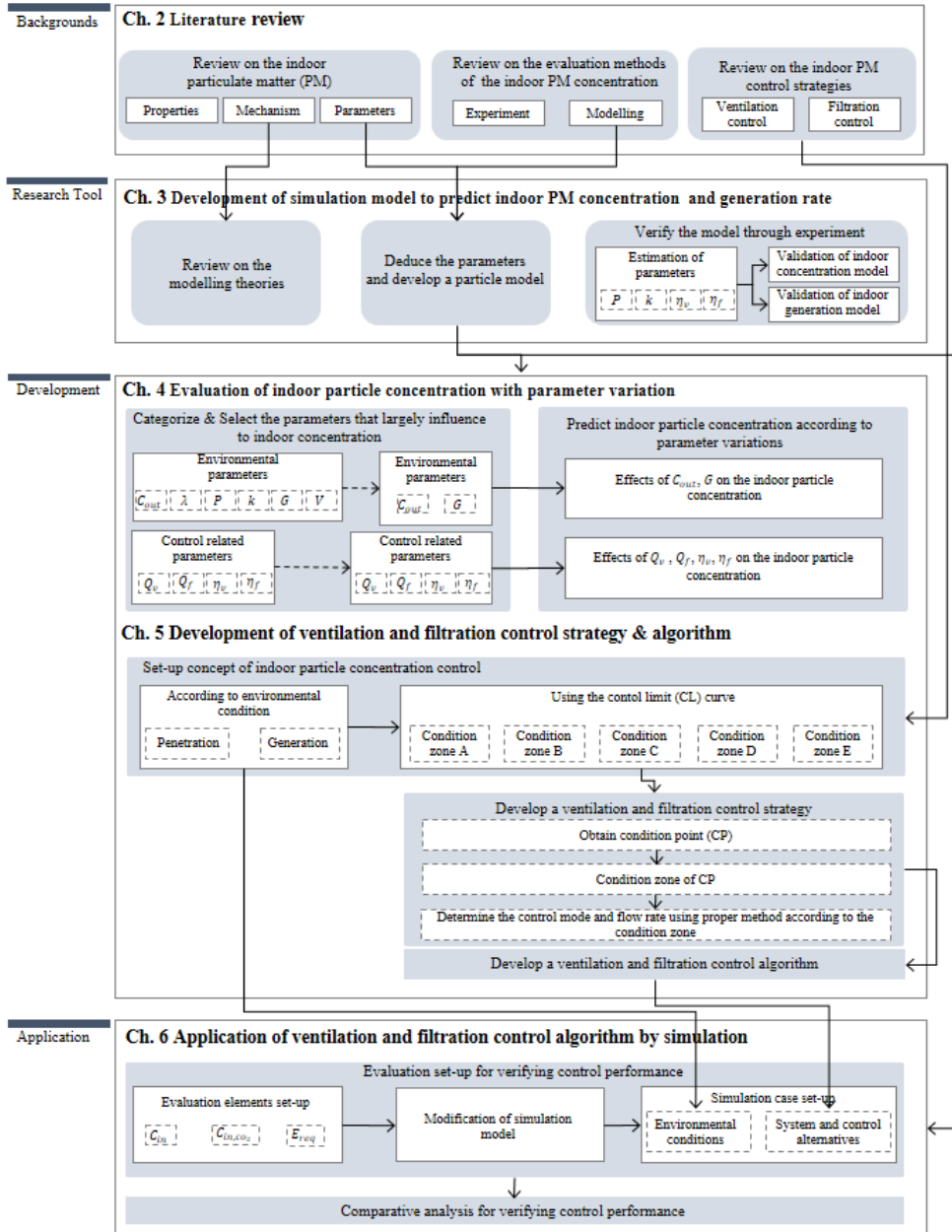


Fig. 1.1 Research process and method

제 2 장

실내 미세먼지 제어를 위한 예비적 고찰

- 2.1 실내 미세먼지 농도 형성 개요
 - 2.2 실내 미세먼지 평가방법
 - 2.3 Ventilation과 Filtration 제어 관련 기존 연구
 - 2.4 소 결
-

본 장에서는 실내 미세먼지 농도 영향 평가 및 농도 제어 방법에 관한 기존 연구를 고찰하였다. 본 연구의 대상 오염물질인 미세먼지의 특성 및 건강에 대한 위해성을 살펴보고, 미세먼지 농도 영향 평가를 위해 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘의 이해를 통해 농도 형성에 영향을 미치는 인자를 파악하였다. 실내 미세먼지 농도 평가를 위해 기존의 평가 방법을 상세히 고찰하고 분석하여 적정 평가방법 선정에 참고하였다. 또한 실내 미세먼지 농도 제어를 위한 Ventilation과 Filtration 제어와 관련된 기존 연구를 고찰함으로써 본 연구에서 제시하고자 하는 제어의 방향을 설정하였다.

2.1 실내 미세먼지 농도 형성 개요

2.1.1 미세먼지의 특성

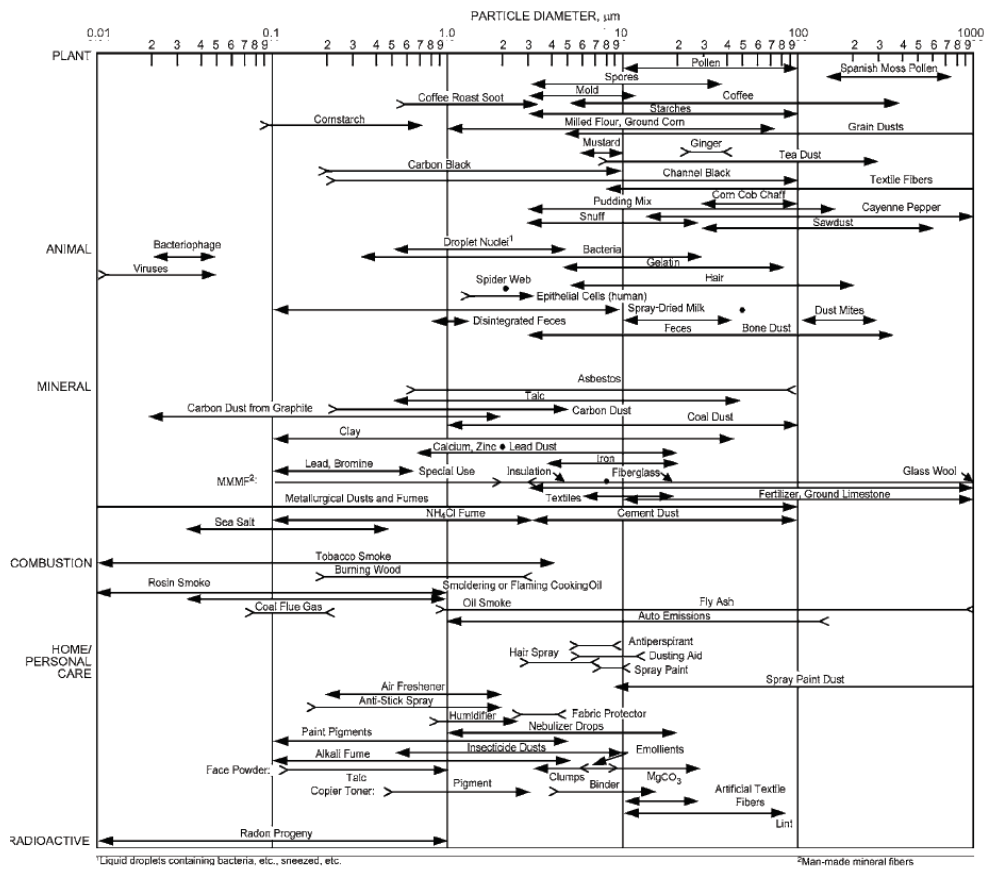
미세먼지는 다양한 발생원이 존재하고 발생원에 따라 그 구성이 다르다. 모래먼지, 흙과 같이 자연적으로 발생하는 미세먼지의 경우 무기질 성분을 많이 함유하고 있는 반면 화석연료의 연소나 자동차 등의 배출가스 등과 같이 인위적으로 발생한 미세먼지의 경우 질소산화물, 황산화물, 무기질, 유기탄소, 그리고 중금속 등을 포함하고 있다.¹⁵

실내 환경에는 다양한 발생원에 의해 다양한 입경의 미세먼지가 생성된다 (Fig.2.1 참조). 학술적으로 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이상 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지를 Coarse particle, 입경 $0.1\mu\text{m}$ 이상 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지를 Fine particle, 입경 $0.1\mu\text{m}$ 이하를 Ultra fine particle이라 분류하고 있으며, 통상적으로 입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지를 PM_{10} , 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지를 $\text{PM}_{2.5}$ 라 칭한다 (Fig. 2.2참조).¹⁶ Coarse particle은 입자의 직경이 크기 때문에 표면적이 작고 대기 중에 수일 정도 밖에 체류하지 않아 유해물질을 많이 흡착할 수 없어 위해성이 크지 않다. 그러나 Fine particle의 경우 입자의 직경이 작고 표면적이 크며, 대기 중에 수일에서 수개월까지 체류하기 때문에 많은 유해물질을 흡착하여 위해성이 크다.¹⁷

15 강공언, 김신도, 이정실, 최경순. 실내 공기질 관리학. 문운당. 2012;66-67.

16 United States Environmental Protection Agency. Particulate matter (PM) Pollution. <https://www.epa.gov/pm-pollution> (accessed 20 December 2016).

17 김용표. 2006, 서울의 미세먼지에 의한 대기오염. 한국대기환경학회지. 2006;22:535-

Fig.2.1 Sizes of indoor particles¹⁸

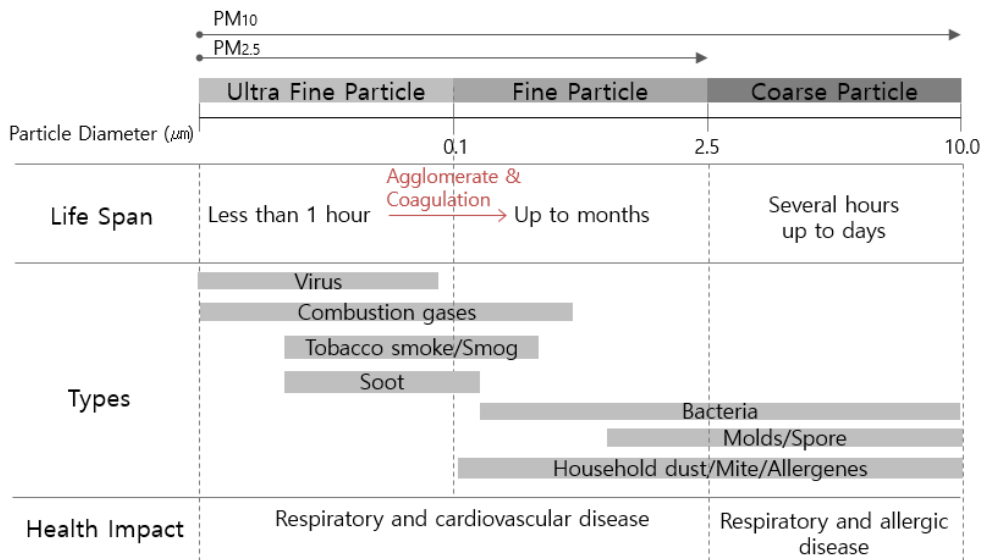


Fig.2.2 Particle characteristics according to particle diameter

공기 중에 부유하고 있는 미세먼지는 호흡 등을 통해 인체로 유입되게 되는데, 전술한 바와 같이 미세먼지는 인체에 유해한 성분으로 구성되어 있으므로 인체로 유입될 경우 천식과 같은 알레르기 반응부터 장시간 노출로 인해 호흡기 및 심혈관 질환이 발생할 수 있고, 심하면 사망에 까지 다다를 수 있다.^{19,20,21}

- 19 Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, Holguin F, Hong Y, Luepker RV, Mittleman MA, Peters A, Siscovick D, Smith SC, Whitel L and Kaufman JD. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease An update to the scientific statement from the american heart association. *Circulation* 2010;121:2331-2378.
- 20 Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B and Brunekreef B. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ. Health.* 2013;12:43.
- 21 Shah ASV, Lee KK, Mcallister DA, Hunter A, Nair H, Whiteley W, Langlish JP, Newby DE and Mills NL. Short term exposure to air pollution and stroke : systematic review and meta-analysis. *Brit. Med. J.* 2015;350:h1295.

미세먼지의 위해성은 미세먼지의 입경과 밀접한 연관이 있다. 미세먼지는 발생원에 따라 다양한 성분으로 구성되는데, 대체로 인위적으로 발생한 미세먼지가 입경이 작고 중금속 등 인체에 유해한 성분의 비율이 높다. 이는 입경이 작아짐에 따라 표면적이 입경의 제곱에 비례하여 증가하므로 중금속 등 인체에 유해한 성분이 입자의 표면으로 노출되기 쉬워져 유해성분의 농도가 비례적으로 증가하기 때문이다.²²

또한, 입경의 크기가 작을수록 폐포와 같이 체내 깊숙한 곳으로 침투 및 침착되므로 인체에 대한 위해도가 높아진다.^{23,24} 입경 10 μm 이상의 미세먼지는 대부분 코와 입 등에서 걸러지는 반면에, 입경 10 μm 이하의 경우 코와 입을 거쳐 체내로 유입되고, 그 중에서도 입경 2.5 μm 이하의 미세먼지는 인체 깊숙이 축적되는 비율이 높다.²⁵ 이와 같은 미세먼지의 입경과 인체 위해성 간의 밀접한 연관성으로 인하여 Table 2.1과 같이 우리나라를 포함한 각 나라 또는 기관들이 대기 중 미세먼지 농도 기준을 PM_{2.5}와 PM₁₀로 구분하여 가이드라인을 제시하고 관리하고 있다.

22 차동원. op.cit., 79.

23 Kim K, Kabir E and Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environ. Int. 2015;74:136-143.

24 Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B and Herbarth O. The effect of particle size on cardiovascular disorders — The smaller the worse. Sci. Total Environ. 2011;409:4217-4221.

25 김신도 (2003), 미세먼지 규제와 영향, 공기청정기술, pp. 19-28.

Table 2.1 Role of each model in indoor particle concentration evaluation

	Averaging period	PM _{2.5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
WHO ^a	24-hour	25	50
	One year	10	20
Australia ^b	24-hour	25	50
	One year	8	-
Canada ^c	24-hour	28	-
	One year	10	-
China ^d	24-hour	75	150
	One year	35	70
EU ^e	24-hour	-	50
	One year	25	40
Hong Kong ^f	24-hour	75	100
	One year	35	50
Japan ^g	24-hour	35	100
	One year	15	-
Taiwan ^h	24-hour	35	125
	One year	15	65
United States ⁱ	Daily average	35	150
	Annual mean	12	-
Korea ^j	24-hour	50	100
	One year	25	50

a. World Health Organization, WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide, 2005.

b. <http://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-national-standards-criteria-air-pollutants-australia> 2005.

c. Canadian Council of Ministers of the Environment, CANADA-WIDE STANDARDS for PARTICULATE MATTER and OZONE, 2000.

d. <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/dqhjlzb/201203/W020120410330232398521>

e. <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>

f. http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/air_quality_objectives/air_quality_objectives.html

g. http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/PM2.5/index.html

h. http://air.epa.gov.tw/Public/suspended_particles.aspx

i. https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/s_pm_history.html

j. <http://www.airkorea.or.kr/airStandardKorea>

2.1.2 실내 미세먼지의 농도 형성 메커니즘

실내 공기 중 미세먼지 농도는 Fig. 2.3과 같이 실내 미세먼지를 증가시키는 생성과정과 감소시키는 제거과정의 영향을 받아 형성된다. 이같은 과정에 의한 미세먼지의 농도 변화는 질량보존에 근거한 수식으로 표현이 가능하며, 식(2.1)과 같다. 이 때, 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 과정은 ① 실내외 공기 교환 과정 ② 실내 미세먼지 발생 과정 ③ 실내 미세먼지 제거 과정으로 구분 할 수 있다. 각 과정에서의 미세먼지 농도의 생성과 제거는 후술하는 바와 같다.

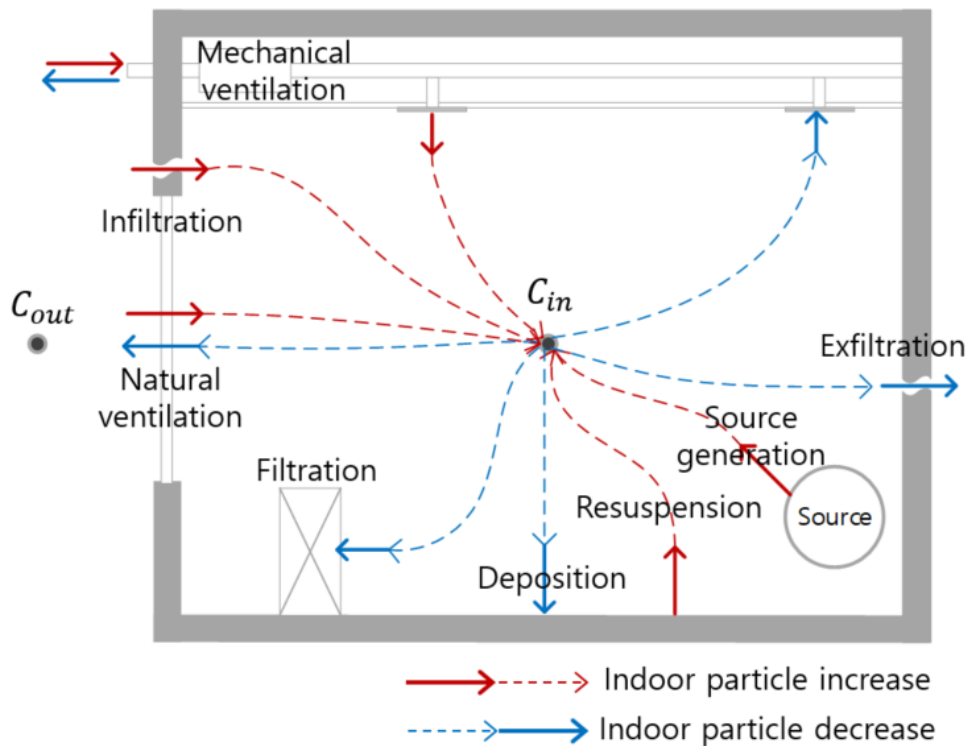


Fig.2.3 Mechanism of indoor particle concentration

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{I-O} + \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{gen} + \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{removal} \quad (2.1)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{I-O}$: Change rate of indoor particle concentration due to indoor-outdoor air exchange process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{gen}$: Change rate of indoor particle concentration due to indoor generation process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{removal}$: Change rate of indoor particle concentration due to removal process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]

$$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{I-O} = \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{inf/exf} + \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{vent} \quad (2.2)$$

여기서,

$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{I-O}$: Change rate of indoor particle concentration due to indoor-outdoor air exchange process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{inf/exf}$: Change rate of indoor particle concentration due to infiltration and exfiltration process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{vent}$: Change rate of indoor particle concentration due to ventilation process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]

① 실내외 공기 교환 과정

건물의 외피 틈새, 연결부, 균열 등의 crack에서의 침기 또는 누기에 의한 실내외 공기 교환 과정과 열린 창이나 문 등의 개구부에서의 자연 환기 또는 환기 시스템을 통한 기계환기에 의한 실내외 공기 교환 과정을 통해 실외 미세먼지가 실내로 유입되거나 실내 미세먼지가 실외로 유출된다. 실내외 공기의 교환 과정에서의 실내 미세먼지 농도 변화는 식 (2.2)와 같이 표현 된다.

② 실내 미세먼지 제거 과정

실내 미세먼지는 미세먼지가 실내 표면에 침착되거나 실내 공기청정 시스템의 필터링을 통해 실내 공기로부터 제거된다. 실내 미세먼지 제거 과정으로 인한 실내 미세먼지 농도 변화는 식(2.3)과 같이 표현 된다.

③ 실내 미세먼지 발생 과정

실내 미세먼지는 흡연, 조리 등 직접적인 실내 발생원에 의해 새로이 발생되거나 실내 표면에 침착되었던 미세먼지가 재실자의 움직임에 의해 재부유함으로써 발생된다. 실내 미세먼지 발생 과정으로 인한 실내 미세먼지 농도 변화는 식(2.4)와 같이 표현 된다.

$$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{removal} = \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{dep} + \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{filt} \quad (2.3)$$

여기서,

$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{removal}$:	Change rate of indoor particle concentration due to removal process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{dep}$:	Change rate of indoor particle concentration due to deposition process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{filt}$:	Change rate of indoor particle concentration due to filtration process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]

$$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{gen} = \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{source} + \left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{res} \quad (2.4)$$

여기서,

$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{gen}$:	Change rate of indoor particle concentration due to indoor generation process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{source}$:	Change rate of indoor particle concentration due to indoor source generation process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
$\left(\frac{dC_{in}}{dt}\right)_{res}$:	Change rate of indoor particle concentration due to resuspension process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]

2.1.3 실내 미세먼지의 농도 형성 영향인자

① 실외농도(Outdoor particle concentration)

대기 중 미세먼지는 침기, 환기(자연환기, 기계환기) 등에 의해 건물 내로 유입되는데, 이때 실외 미세먼지 농도가 높을수록 실내로 유입되는 미세먼지의 농도가 비례하여 증가하므로 실외 미세먼지 농도는 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 실외 미세먼지 농도는 도심지, 외곽지 등의 주변 환경에 따라 공간적으로 분포가 다르며²⁶ 동일한 지역에서도 시간에 따라 농도 분포가 계속적으로 변화한다.

② 침투계수(Penetration coefficient)

대기 중에 존재하는 미세먼지는 건물의 다양한 공기 이동경로를 통해 실내로 유입되는데 이러한 과정을 침투(Penetration)라고 한다. 대기 중의 미세먼지가 실내로 유입할 때 건물 외피나 문, 창문 프레임 등의 틈새에서 제거된 후 실내로 침투하는 비율을 침투계수(Penetration coefficient 또는 Penetration factor)라고 한다. 기존 연구결과에²⁷ 따르면 침투 계수는 창, 개구부, 벽체, 건물 틈새 등 건물의 특성과 실내외 압력차 등의 환경의 영향을 받는다. 침투계수는 또한 미세먼지의 입경의 영향을 크게 받는다. 건물의 틈새 등에서 침착되는 정도가 입경의 크기에 따라 다르기 때문이

26 Nazaroff W. Indoor particle dynamics. Indoor air. 2004;14:175-183.

27 Liu D, Nazaroff WW. Modeling pollutant penetration across building envelopes. 2001;35:4451-4462.

다. Fig 2.4에서 보는 바와 같이 Ultra fine particle과 Coarse particle 입경 범위보다 Fine particle 입경 범위의 침투계수가 큰 것을 확인할 수 있다. Ultra fine particle 입경의 미세먼지의 경우, 브라운 운동에 의해 외피에서 쉽게 침착되고, Coarse particle 입경의 미세먼지는 차단(Interception), 충돌(Impaction), 중력침강(Gravitational settling)에 의해 침착된다.²⁸ 따라서, 실외 미세먼지가 중 Coarse Particle 보다 Fine Particle의 입경이 더 쉽게 실내로 침투할 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

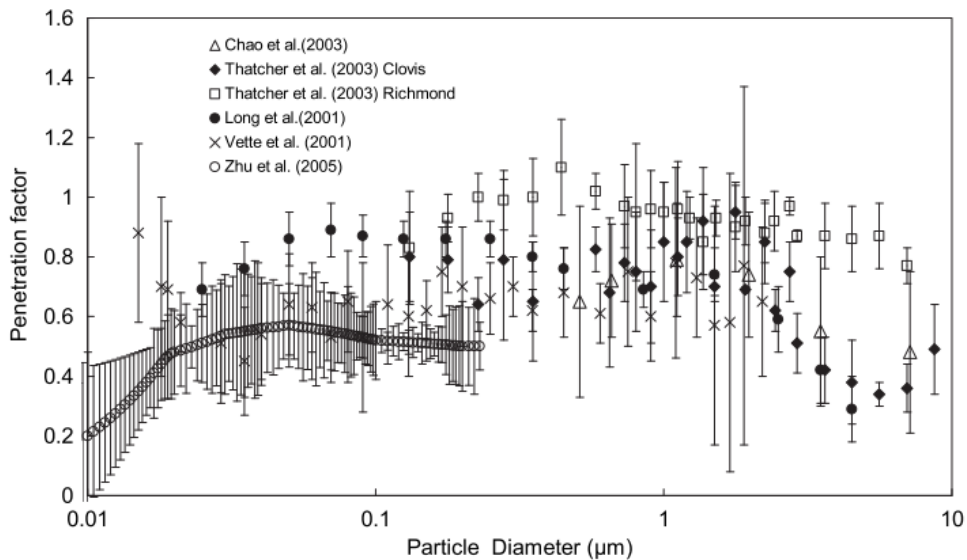


Fig. 2.4 Comparison of penetration coefficient as a function of particle size²⁹

28 Zhang Y. Indoor air quality engineering. CRC Press. 2004;280–285.

29 Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles : I / O ratio, infiltration factor and penetration factor. Atmospheric Environment. 2011;45:275–288.

④ 침기율(Infiltration rate)

침기란 의도되지 않은 실내외 공기교환을 의미하며, 단위시간동안 침기에 의해 유입된 공기의 부피를 실의 부피로 나눈 값을 침기율이라 한다. 침기율은 실내외 온도차, 풍속과 풍향, 건물의 외피 형상, 건물의 기밀성능, 기계설비시스템 등 다양한 요소의 영향을 받는다. 따라서 동일한 외부 환경에서도 건물마다 침기율이 다르며, 같은 건물이라도 외부 또는 내부의 환경에 따라 침기율이 달라질 수 있다.

Wallace³⁰의 연구에서 4,000세대 이상의 주거건물을 대상으로 1년간 침기율을 측정한 결과, 건물과 계절에 따라 그리고 동일한 건물에서도 높이에 따라 침기율이 다르게 나타났다. 동일한 건물에서 장기간 측정한 침기율 데이터의 경우, 정규분포를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 사실은 다양한 인자에 의해 침기율은 변동하지만, 빈도수가 높은 침기율이 존재함을 의미한다.

⑤ 침착계수(Deposition rate)

실내 공기에 부유하고 있는 미세먼지는 브라운 운동, 관성충돌, 중력침강 등으로 인해 실내 표면에 침착(Deposition)된다. 단위시간당 실내 미세먼지가 실내 표면에 침착 되는 정도를 침착계수(Deposition rate)라 한다. 미세먼지가 실내 표면에 침착 되면 공기 중에 부유하고 있는 미세먼지의

30 Wallace LA, Emmerich SJ, Howard-reed C. Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. 2002;12:296-306.

수가 줄어들기때문에 침착계수는 실내의 미세먼지 농도 감소와 관련된 영향인자이다.

침착계수는 실내 표면의 특성과 실내 기류와 함께 미세먼지의 입경의 영향을 받는다. 침착계수는 Fig. 2.5과 같이 입경에 따라 V-shape 형태를 보이며 Fine particle 입경에서 가장 낮은 값을 보인다. Ultra fine particle 입경 범위는 브라운 운동에 의해 실내 표면에 쉽게 침착되고, Coarse particle 입경 범위는 중력침강(Gravitational settling)에 의해 침착된다.³¹

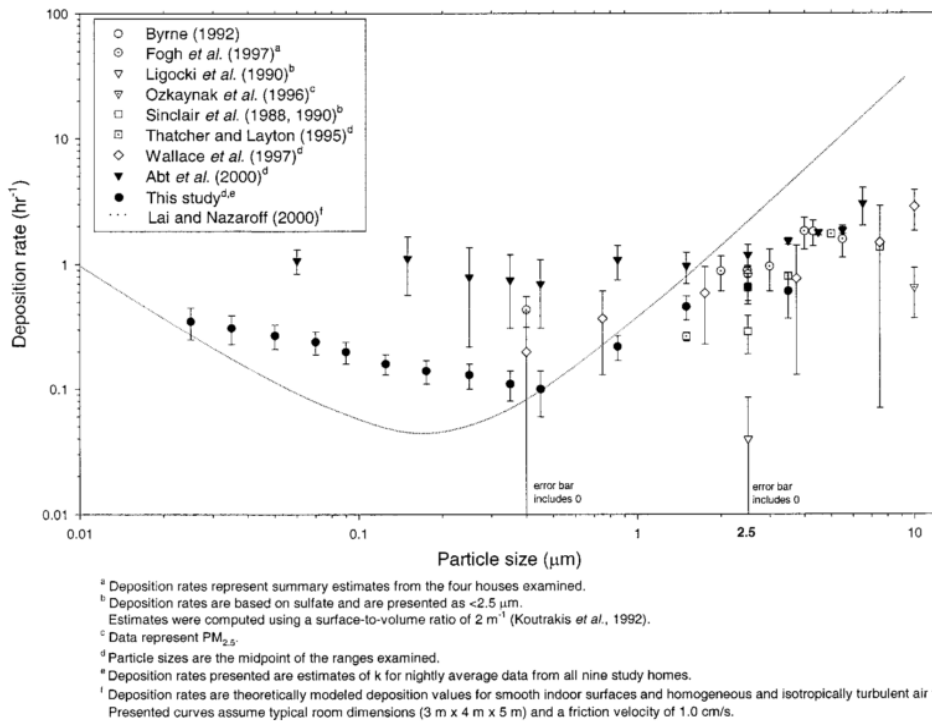


Fig. 2.5 Comparison of deposition rate as a function of particle size³²

31 Zhang Y. Indoor air quality engineering. CRC Press. 2004;280–285.

32 Long CM, Suh HH, Catalano PJ, Koutrakis P. Using time-and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior. Environmental Science & Technology. 2001;35:2089–2099.

⑥ 실내 미세먼지 발생율(Indoor source generation rate)

조리, 흡연, 청소, 움직임 등 거주자의 다양한 실내 활동은 미세먼지를 발생시킨다. 실내 미세먼지의 발생은 엄밀히 구분하면 조리과 흡연과 같은 직접적인 발생원이 미세먼지를 생성시켜 실내에 미세먼지를 증가시키는 경우와 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지가 거주자의 움직임에 의해 실내 공기로 재부유되어 실내 미세먼지가 증가되는 경우로 구분할 수 있다. 그러나 이 두가지 발생과정을 명확히 분리하여 파악하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 발생원 별로 발생량을 파악하려는 연구나 재부유의 현상을 따로 해석하는 것을 목적으로 하는 연구를 제외하고, 실내 농도가 실외 유입 또는 실내발생에 의해 얼마나 증가하는지에 관심이 있는 기존의 많은 연구에서는 실내발생 해석시 둘을 따로 구분하지 않는다. 실내 미세먼지 농도 측면에서는 실내 미세먼지의 직접적인 생성과 재부유 모두 실의 내부에 기인한 실내 미세먼지 농도 증가 현상이기 때문이다. 본 연구에서는 단위 시간당 실내에서 직접 생성되거나 재부유된 미세먼지의 질량을 모두 합한 값을 실내 미세먼지 발생율이라 하였다.^{33,34}

실내 미세먼지의 발생원에 따라 주로 발생하는 미세먼지의 입경 특성이 다르며, 다수의 연구자들이 미세먼지의 입경별 실내 발생원 분석을 위한 연구를 수행한 바 있다.¹⁹⁻³² Fig. 2.6에서 정리한 바와 같이 Fine

33 Abt, E., Suh, H., Allen, G., & Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources: A study conducted in the metropolitan Boston area. *Environmental Health Perspectives*, 108(1), 35-44.

34 Afshari, a, Matson, U., & Ekberg, L. E. (2005). Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*, 15(2), 141-50.

Particle 영역에 해당하는 미세먼지는 주로 조리, 흡연, 양초 연소와 같이 연소를 동반하는 발생원에 의해 주로 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 청소 또는 재실자의 움직임 등은 주로 Coarse Particle을 발생시키는 발생원이라는 것을 알 수 있다.

-
- 35 Alshitawi, M., & Awbi, H. (2011). Measurement and prediction of the effect of students' activities on airborne particulate concentration in a classroom. *HVAC&R Research*, (17:4), 446-464.
 - 36 Branis, M., Rezáčová, P., & Domasová, M. (2005). The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM(10), PM(2.5), and PM(1) in a classroom. *Environmental Research*, 99(2), 143-149.
 - 37 Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2009). Particle emission factors during cooking activities. *Atmospheric Environment*, 43(20), 3235-3242.
 - 38 Cheng, K.-C., Goebes, M. D., & Hildemann, L. M. (2010). Association of size-resolved airborne particles with foot traffic inside a carpeted hallway. *Atmospheric Environment*, 44(16), 2062-2066.
 - 39 Diapouli, E. (2011). Indoor and outdoor particle number and mass concentrations in Athens. sources, sinks and variability of aerosol parameters. *Aerosol and Air Quality Research*, 11, 632-642.
 - 40 Ferro, A. (2004). Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 38(6), 1759-1764.
 - 41 Long, C. M., Suh, H. H., & Koutrakis, P. (2000). Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(7), 1236-1250.
 - 42 McDonagh, a., & Byrne, M. a. (2014). A study of the size distribution of aerosol particles resuspended from clothing surfaces. *Journal of Aerosol Science*, 75, 94-103.
 - 43 Rosati, J. a., Thornburg, J., & Rodes, C. (2008). Resuspension of Particulate Matter from Carpet Due to Human Activity. *Aerosol Science and Technology*, 42(6), 472-482.
 - 44 Thatcher, T., & Layton, D. (1995). Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. *Atmospheric Environment*, 29(13), 1487-1497.
 - 45 Wallace, L. (2004). Source strengths of ultrafine and fine particles due to cooking with a gas stove. *Environmental Science & Technology*, 38, 2304-2311.
 - 46 Wallace, L. (2006). Indoor Sources of Ultrafine and Accumulation Mode Particles: Size Distributions, Size-Resolved Concentrations, and Source Strengths. *Aerosol Science and Technology*, 40(5), 348-360.

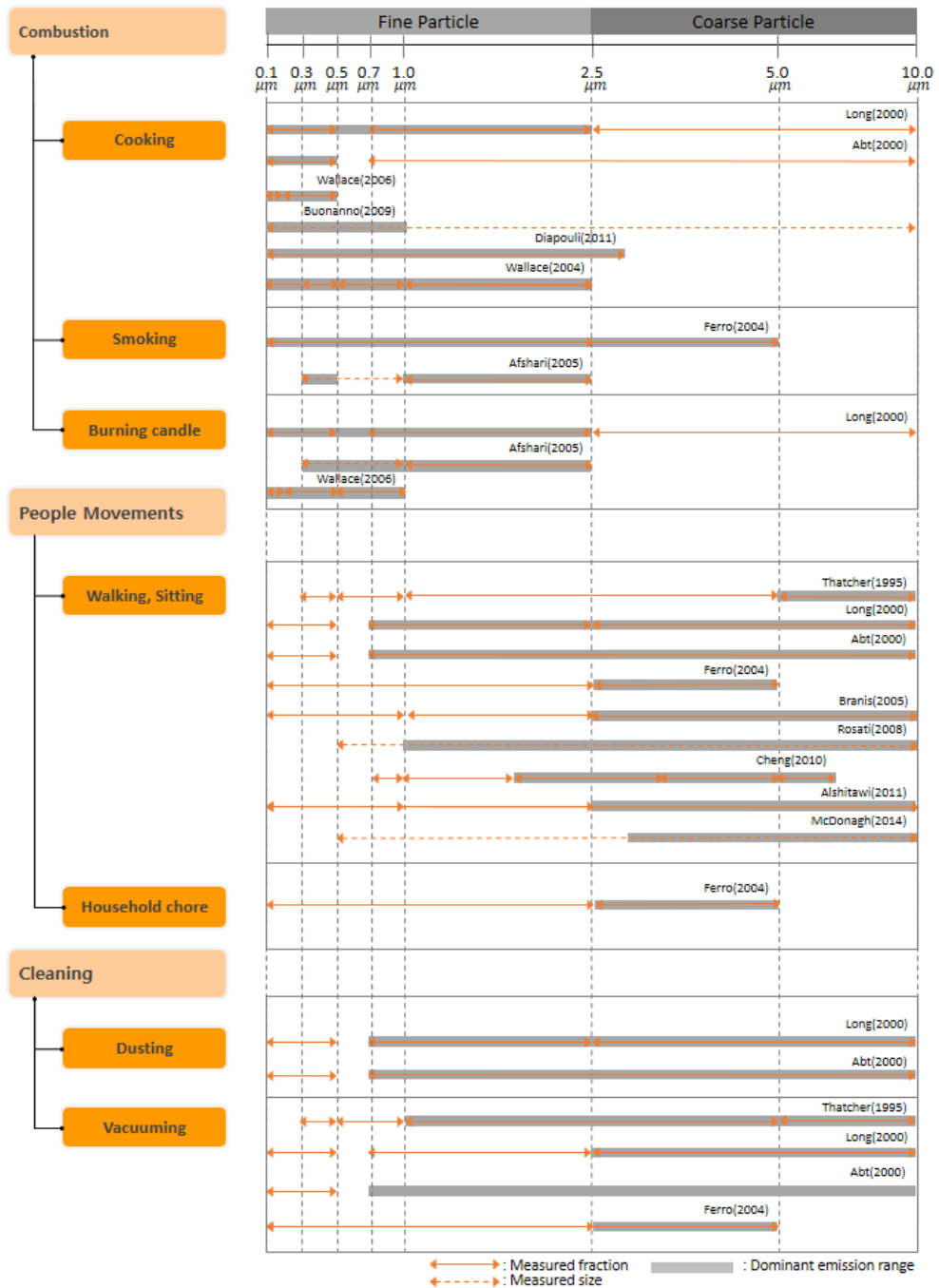


Fig. 2.6 Diameter range of particles generated from each indoor source

⑦ 환기율(Ventilation airflow rate)

환기(Ventilation)란 의도한 실내외 공기교환을 의미하며, 단위시간당 환기에 의해 유입된 공기의 부피를 실의 부피로 나눈 값을 환기율이라고 한다. 자연환기에 의한 환기율은 실내외 온도차, 풍속과 풍향, 건물의 외피 형상, 개구부 특성 등 다양한 요소의 영향을 받는다. 기계 환기 시스템을 통해 환기하는 경우, 외기를 일정하고 안정적으로 실내로 공급할 수 있다. 국내 신축 공동주택의 경우, 기계환기를 통해 최소 환기율($0.5h^{-1}$)을 확보할 수 있도록 대부분 전열교환 환기 시스템이 적용되어 있다.

⑧ 공기청정기 풍량(Filtration airflow rate)

공기청정(Filtration)이란 실내 공기를 순환시켜 필터에 의해 미세먼지를 제거하는 과정을 의미하며, 단위 시간당 공기청정기를 통과하는 실내공기가 많을수록 즉, 공기청정기 풍량이 클수록 실내 미세먼지가 더 많이 더 빠르게 제거된다. Fisk⁴⁷의 연구에 의하면, 알레르기를 일으키는 오염물질의 농도를 50% 수준까지 감소시키기 위해서는 공기청정기 풍량을 시간당 실 부피의 수배(A few indoor volumes per hour) 정도로 확보해야 한다고 보고하였다.

47 Fisk WJ, Faulkner D, Palonen J, Sepanen O. Performance and costs of particle air filtration technologies. Indoor air. 2002;12:223-234.

⑨ 필터효율(Filter efficiency)

필터의 효율은 일정한 양의 먼지가 필터를 통과하였을 때, 제거되는 먼지의 비율이라고 할 수 있다. 필터의 효율을 측정하는 방법은 중량법, 비색법, 계수법 등의 3가지 방법으로 구분된다. 중량법은 일정량의 분진을 통과시켜 필터 전과 후의 중량을 비교하는 방법으로 주로 프리필터 등의 성능이 낮고 중량이 큰 먼지를 걸러내는 필터의 성능을 측정하는 방법으로 사용된다. 비색법은 필터 통과 전과 후의 공기를 여과지에 공급하고 여과지에 빛을 투과하여 투과된 양을 비교하여 효율을 계산하는 방법으로 주로 미디움필터 등의 중필터의 성능을 측정하는 방법으로 사용된다. 마지막으로 계수법은 특정 크기 입자에 대해서 필터 통과 전과 후의 개수 농도를 비교하는 방법으로 $0.3\mu\text{m}$ 입자를 비교하여 헤파필터의 성능을 측정하는데 사용된다.

미국과 유럽에서는 필터의 성능에 따라 효율 등급 기준을 제시하고 있다. 특히 미국의 경우 효율 등급을 미세먼지의 입경별로 구분하여 제시하고 있다. 유럽의 경우 Table 2.2와 같이 EN 779⁴⁸와 EN 1822⁴⁹ 기준을 적용하고 있으며, 미국의 경우 Table 2.3과 같이 ASHRAE⁵⁰ 기준을 적용하고 있다.

48 BS EN 779:2012. Particulate air filters for general ventilation. Determination of the filtration performance. 2012.

49 CSN EN 1822-1:2009. High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking. 2009.

50 ANSI/ASHRAE. ASHRAE 52.2-2012. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size. 2012

Table 2.2 Filter performance classification by EN 779 and EN 1882

Class	EN 779:2012		EN 1882:2009	
	Average arrestance [%]	Average efficiency on 0.4 μ m [%]	Minimum efficiency on 0.4 μ m [%]	Average efficiency at MPPS [%]
G1	$50 \leq A_m < 65$	-	-	-
G2	$65 \leq A_m < 80$	-	-	-
G3	$80 \leq A_m < 90$	-	-	-
G4	$90 \leq A_m$	-	-	-
M5	-	$40 \leq E_m < 60$	-	-
M6	-	$60 \leq E_m < 80$	-	-
F7	-	$80 \leq E_m < 90$	35	-
F8	-	$90 \leq E_m < 95$	55	-
F9	-	$95 \leq E_m$	70	-
E10	-	-	-	<85
E11	-	-	-	<95
E12	-	-	-	<99.5
H13	-	-	-	<99.95
H14	-	-	-	<99.995
U15	-	-	-	<99.9995
U16	-	-	-	<99.99995
U17	-	-	-	<99.999995

Table 2.3 Filter performance classification by ASHRAE 52.2

MERV rating	Minimum efficiency [%]		
	Particle range 1 (0.3 to 1 μ m)	Particle range 2 (1 to 3 μ m)	Particle range 3 (3 to 10 μ m)
1	-	-	$E_3 < 20$
2	-	-	$E_3 < 20$
3	-	-	$E_3 < 20$
4	-	-	$E_3 < 20$
5	-	-	$20 \leq E_3 < 35$
6	-	-	$35 \leq E_3 < 50$
7	-	-	$50 \leq E_3 < 70$
8	-	-	$70 \leq E_3$
9	-	$E_2 < 50$	$75 \leq E_3$
10	-	$50 \leq E_2 < 65$	$80 \leq E_3$
11	-	$65 \leq E_2 < 80$	$85 \leq E_3$
12	-	$80 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
13	$E_1 < 70$	$90 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
14	$75 \leq E_1 < 85$	$90 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
15	$85 \leq E_1 < 95$	$90 \leq E_2$	$90 \leq E_3$
16	$95 \leq E_1$	$95 \leq E_2$	$95 \leq E_3$

2.2 실내 미세먼지 평가방법

2.2.1 측정에 의한 평가

2.1.2와 2.1.3절에서 살펴보았듯이 실내 미세먼지 농도는 실외의 미세먼지가 실내로 유입되거나 실내 발생에 의해 증가한다. 그리고 증가된 실내 미세먼지는 실외로 다시 유출되거나 실내의 표면에 침착 또는 공기청정기와 같은 기계적인 시스템에 의해 감소될 수 있다. 그에 따라 실외 미세먼지가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향,^{51,52,53} 다양한 실내 발생원이 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향,^{54,55} 실내 미세먼지 제거 시스템의 효과⁵⁶ 등을 측정한 연구가 다수 진행된 바 있다.

측정에 의한 실내 미세먼지 농도 영향 평가는 가장 현실과 유사한 데

51 Polidori A, Arhami M, Sioutas C, Delfino R, Allen R. Indoor/outdoor relationships, trends, and carbonaceous content of fine particulate matter in retirement homes of the Los Angeles Basin. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012;57:336-379.

52 Chatoutsidou SE, Ondráček J, Tesar O, Tørseth K, Ždímal V, Lazaridis M. Indoor / outdoor particulate matter number and mass concentration in modern offices. *Building and Environment*. 2015;92:462-474.

53 Guo H, Morawska L, He C, Zhang YL, Ayoko G, Cao M. Characterization of particle number concentrations and PM2.5 in a school: influence of outdoor air pollution on indoor air. *Environmental science and pollution research international*. 2010;17:1268-1278.

54 Ferro AR, Kopperud RJ and Hildemann LM. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:1759-1764.

55 Urso P, Cattaneo A, Garramone G, Peruzzo C, Cavallo DM and Carrer P. Identification of particulate matter determinants in residential homes. *Building and Environment*. 2015;86:61-69.

56 Liuliu D, Batterman S, Parker E, Godwin C, Chin J, O'Toole A, Robins T, Brakefield-Caldwell W, Lewis T. Particle concentrations and effectiveness of free-standing air filters in bedrooms of children with asthma in Detroit, Michigan. *Building and Environment*. 2011;46:2303-2313.

이터를 획득하여 이를 근거로 판단한다는 점에서 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 그러나 특정한 환경조건 하에서 얻어진 데이터들이 다른 환경조건에서는 그대로 이용될 수 없다는 한계를 갖고 있다. 특히, 실외 미세먼지 농도나 실내 미세먼지 발생 조건은 시간에 따라 계속적으로 변화하는 인자로서 그에 따라 실내 미세먼지 농도 역시 동적으로 변화한다. 또한, 측정의 경우 인자의 영향이 복합적이므로 특정 인자의 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 정확히 알 수 없어 다양한 인자들이 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하는 데에 제약이 따른다.

2.2.2 모델링에 의한 평가

측정을 통한 실내 미세먼지 농도 평가의 한계로 인하여 모델링을 통한 미세먼지 예측 및 분석에 대한 필요성이 대두됨에 따라 질량보존식을 기반으로 하는 다양한 실내 미세먼지 농도 예측해석모델이 개발 연구되고 있다. 연구자의 연구목적에 따라 질량보존식의 형태와 구현 방법이 상이할 수 있으나, 실내 발생원 고려 정도에 따라 Non-source model, Single-source model, Multi-source model로 분류할 수 있고 (Fig. 2.7 참조), 지난 시간의 실내 농도의 영향을 고려하는지에 따라 Steady model과 Dynamic model로 분류할 수 있다 (Fig. 2.8 참조). 실내 미세먼지 모델은 실내 발생원과 지난 시간 실내 농도의 영향 고려 정도에 따라 Fig. 2.9과 같은 6개의 유형으로 구분할 수 있으며, 각 모델의 특징을 정리하면 Table 2.4와 같다.

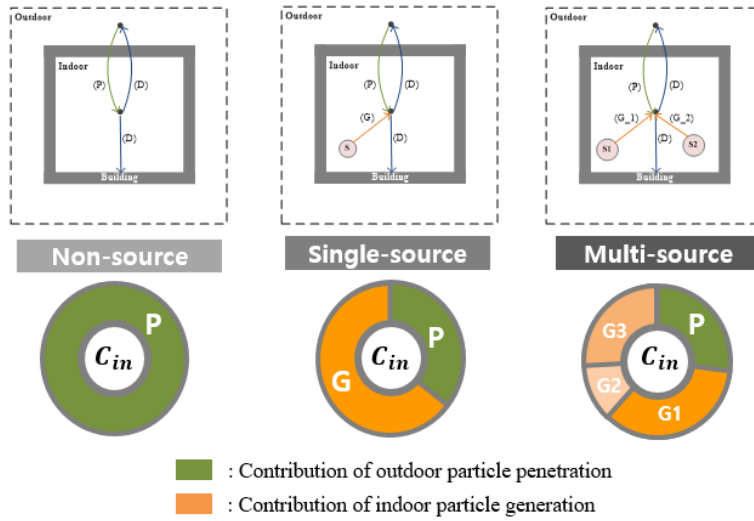


Fig. 2.7 Indoor particle model according to indoor source consideration

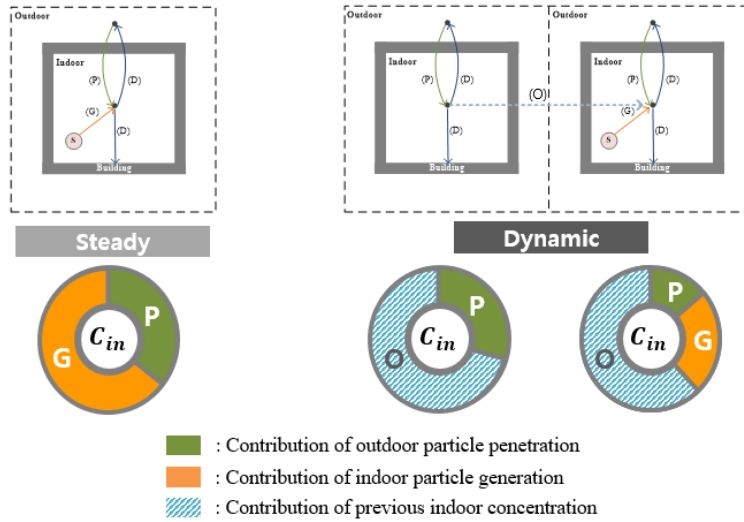


Fig. 2.8 Indoor particle model according to previous time consideration

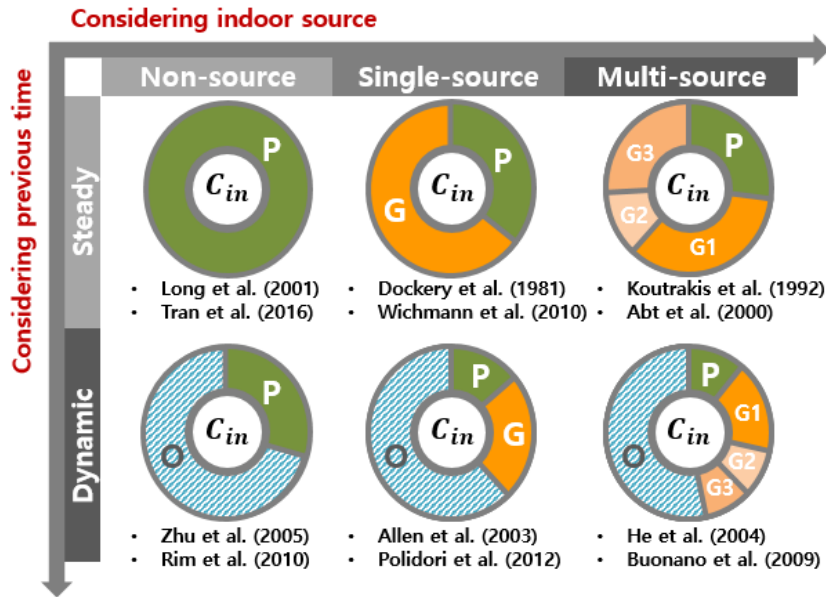


Fig. 2.9 Indoor particle model types

Table 2.4 Role of each model in indoor particle concentration evaluation

Type	Role in indoor particle concentration evaluation
Steady & Non-source model	To evaluate effects of outdoor particles on indoor particle concentrations
Steady & Single-source model	To evaluate relative contribution of outdoor particle penetration and indoor particle generation to indoor concentrations
Steady & Multi-source model	To evaluate relative contribution of outdoor particles and particles generated from the various indoor sources to indoor concentrations
Dynamic & Non-source model	To predict dynamic variation of indoor particle concentration due to outdoor particle penetration
Dynamic & Single-source model	To predict dynamic variation of indoor particle concentration due to outdoor particle penetration and indoor particle generation
Dynamic & Multi-source model	To evaluate particle generation rates of the various indoor sources

① Steady & Non-source model

Steady & Non-source 모델의 목적은 실외 미세먼지가 건물 내부로 침투해 실내 농도에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이며, I/O model이라고도 한다. Steady & Non-source 모델은 실내 미세먼지 농도 기본식인 식(2.5)에서 좌측의 시간에 대한 농도 변화와 우측의 실내 발생 부분을 소거하여 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다. 실외 미세먼지가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향은 Infiltration factor(F_{INF}) 또는 I/O ratio로 판단한다.

$$\begin{array}{cc} \text{Steady condition} & \text{No-indoor generation} \\ \frac{dC_{in}}{dt} = \lambda P C_{out} - \lambda C_{in} - k C_{in} + \frac{G}{V} & \end{array} \quad (2.5)$$

$$C_{in} = \frac{\lambda P}{\lambda + k} C_{out} = F_{INF} \cdot C_{out} = I/O \cdot C_{out} \quad (2.6)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [-]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
F_{INF}	: Infiltration factor [-]
I/O	: Indoor/Outdoor ratio [-]

해당 모델을 활용하여 침투계수와 침착계수를 구하기 위해서는 실내외 미세먼지 농도와 환기율을 측정한 후, Fig. 2.10과 같이 $\frac{C_{out}}{C_{in}}$ 을 y축으로 하고, $\frac{1}{\lambda}$ 를 x축으로 하는 그래프를 1차원 선형회귀하면 된다. 회귀식의 절편과 기울기로부터 각각 침투계수와 침착계수를 획득할 수 있다.

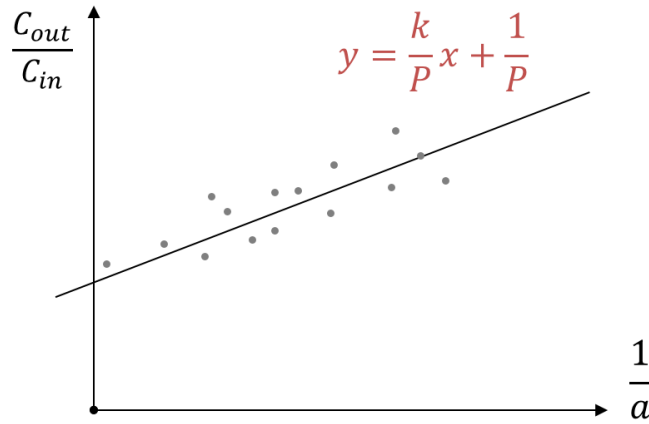


Fig. 2.10 Estimation penetration coefficient and deposition rate using Steady & Non-source model

② Steady & Single-source model

Steady & Single-source 모델의 목적은 실내 농도에 대한 실외 미세먼지의 침투영향 및 실내 발생의 영향을 상대적으로 비교하기 위한 것이며, 기여도 모델(Contribution model)이라고도 한다. Steady & Single-source 모델은 실내 미세먼지 농도 기본식인 식(2.7)에서 좌측의 시간에 대한 농도변화를 소거하여 식(2.8)과 같이 나타낼 수 있다. 실내 미세먼지 농도에 대한 실외 미세먼지 침투의 기여도는 $F_{INF} \cdot C_{out}$ 로 판단하며, 실내 미세먼지 발생의 기여도는 C_{ig} 로 판단한다.

Steady condition

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \lambda P C_{out} - \lambda C_{in} - k C_{in} + \frac{G}{V} \quad (2.7)$$

$$C_{in} = \frac{\lambda P}{\lambda + k} C_{out} + \frac{G}{V(\lambda + k)} = F_{INF} \cdot C_{out} + C_{ig} \quad (2.8)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [-]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
G	: Indoor generation rate [$\mu\text{g}/\text{h}$]
V	: Room volume [m^3]
F_{INF}	: Infiltration factor [-]
C_{ig}	: Concentration of particles generated indoors [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

③ Steady & Multi-source model

Steady & Multi-source 모델의 목적은 실내 농도에 대한 실외 미세먼지 침투영향 및 실내의 다수 발생원의 영향을 상대적으로 비교하기 위한 것이며, 기여도 모델(Contribution model)이라고도 한다. Steady & Multi-source 모델은 실내 미세먼지 농도 기본식인 식(2.9)에서 좌측의 시간에 대한 농도변화를 소거하고, 우측의 실내발생 부분을 발생원 별로 분리하여 식(2.10)과 같이 나타낼 수 있다. 실내외 미세먼지 농도와 환기율을 측정하고 동시에 수집된 Time-activity data를 활용하여, 다중 선형회귀 분석을 하면 식 (2.11)의 F_{INF} , β_0 , β_1 , β_2 , ..., β_i , ε 으로부터 각각의 기여도를 구할 수 있다. 실내 미세먼지 농도에 대한 실외 미세먼지 침투의 기여도는 $F_{INF} \cdot C_{out}$ 로 판단하며, 각 실내 발생원의 기여도는 $\beta_i \cdot T_i$ 로 판단한다.

Steady condition

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \lambda P C_{out} - \lambda C_{in} - k C_{in} + \frac{G_1 + G_2 + \dots + G_i}{V} \quad (2.9)$$

$$C_{in} = \frac{\lambda P}{\lambda + k} C_{out} + \frac{T_1 G_1 + T_2 G_2 + \dots + T_i G_i}{V t (\lambda + k)} + \frac{G_{others}}{V (\lambda + k)} \quad (2.10)$$

$$C_{in} = \beta_0 + F_{INF} \cdot C_{out} + \beta_1 \cdot T_1 + \beta_2 \cdot T_2 + \dots + \beta_i \cdot T_i + \varepsilon \quad (2.11)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [—]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
T_i	: Time period during which source i was activated [h]
t	: Duration of the sampling period [h]
G_i	: Generation rate of source i [$\mu\text{g}/\text{h}$]
V	: Room volume [m^3]
G_{others}	: Generation rate from all other indoor sources [$\mu\text{g}/\text{h}$]
F_{INF}	: Infiltration factor [—]
β_o	: Indoor background concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
β_i	: “Effective” parameters for source i [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
ε	: Calculation error [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

④ Dynamic & Non-source model

Dynamic & Non-source 모델의 목적은 실외 미세먼지의 침투에 의해 시간에 따라 변화하는 실내 농도를 예측 및 평가하기 위한 것이며, Dynamic & Non-source model은 건물의 침투계수와 침착계수를 구하기 위해 활용되는 대표적인 모델이다. 실내 미세먼지 농도 기본식인 식(2.12)에서 우측의 실내 발생 부분을 소거하면 식(2.13)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \lambda P C_{out} - \lambda C_{in} - k C_{in} + \frac{G}{V} \quad (2.12)$$

No-indoor generation

$$C_{in} = \frac{\lambda \cdot P}{\lambda + k} C_{out} (1 - e^{-(\lambda+k)t}) + C_{in,ini} e^{-(\lambda+k)t} \quad (2.13)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [—]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
$C_{in,ini}$: Indoor particle concentration at time 0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
t	: Time [h]

⑤ Dynamic & Single-source model

Dynamic & Single-source 모델의 목적은 실외 미세먼지의 침투 및 실내 발생에 의해 시간에 따라 변화하는 실내 농도를 예측하여 평가하기 위한 것이다. Dynamic & Single-source 모델은 실내 미세먼지 농도 기본식인 식(2.12)로부터 식(2.14)와 같이 정리할 수 있다. 실내 발생율은 먼저 Non-source 조건에서 침투계수(P)와 침착계수(k)를 구한 후, 실내 발생조건에서 시간에 따라 측정된 실내외 미세먼지 농도와 환기율 그리고 앞서 획득한 계수(P, k)를 대입하면 식(2.14)을 통해 구할 수 있다.

$$C_{in} = \left(\frac{\lambda \cdot P}{\lambda + k} C_{out} + \frac{G}{V(\lambda + k)} \right) (1 - e^{-(\lambda + k)t}) + C_{ini} e^{-(\lambda + k)t} \quad (2.14)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [—]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
G	: Indoor generation rate [$\mu\text{g}/\text{h}$]
V	: Room volume [m^3]
C_{ini}	: Indoor particle concentration at time 0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
t	: Time [h]

⑥ Dynamic & Multi-source model

Dynamic & Multi-source 모델의 목적은 실내 발생(prescribed activity)에 의해 시간에 따라 변화하는 실내 농도를 측정하여 각 발생원의 발생율을 평가하는 것이다. Dynamic & Multi-source 모델은 Dynamic & Single-source model을 발생 구간별로 적용한 모델이다.

2.3 Ventilation과 Filtration 제어 관련 기존 연구

2.3.1 Prescribed ventilation과 filtration 제어 연구

실내 미세먼지 제어에 관한 초기의 연구들은 실내외 미세먼지 환경조건과 상관없이 미리 정해진(prescribed) 규칙에 따라 시스템을 제어했을 경우, 실내 미세먼지 농도 개선 효과 등을 비교하는 연구들이 다수 진행되어왔다.

Fisk⁵⁷는 Filtration 제어 시, 적용된 필터 효율에 따라 실내 미세먼지 농도가 얼마나 감소하는지 비교하고, 이때 팬동력에 의한 에너지 및 필터 교체 비용 등을 함께 비교하였다. Howard-Reed⁵⁸의 연구에서는 실내 발생 조건(조리, 양초 연소 등)별로 환기팬을 가동하였을 경우와 그렇지 않은 경우의 실내 농도를 서로 비교하였다.

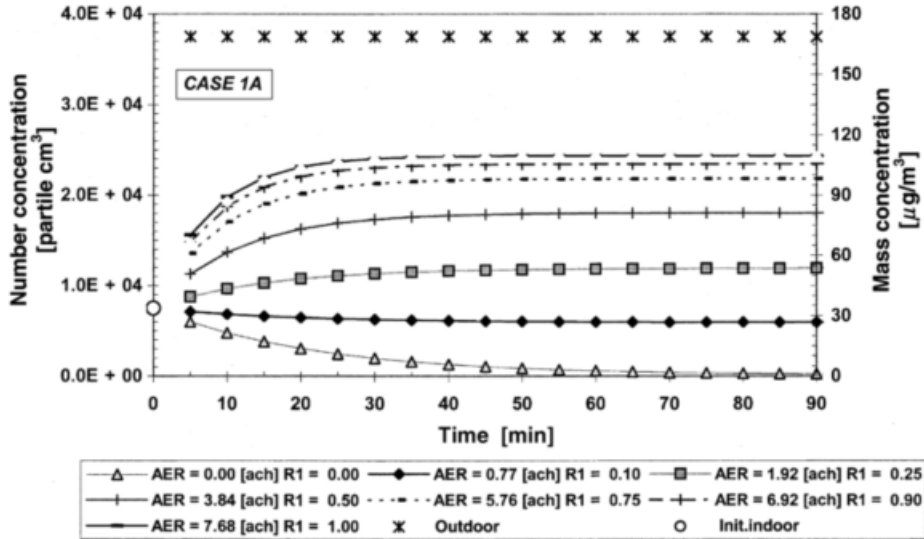
앞의 두 연구가 실내 농도를 비교함에 있어 실외 미세먼지 농도를 함께 고려하지 못한 것에 비하여, Jamriska⁵⁹의 연구에서는 외기 농도>>실내 농도, 외기 농도<<실내 농도, 외기 농도~실내 농도 인 경우의, Ventilation 제어의 효과를 비교하였다. 환경조건에 따라 Ventilation 제어가 Fig. 2.11

57 Fisk W, D F, J P, O S. Performance and costs of particle air filtration technologies. Indoor air. 2002;223-234.

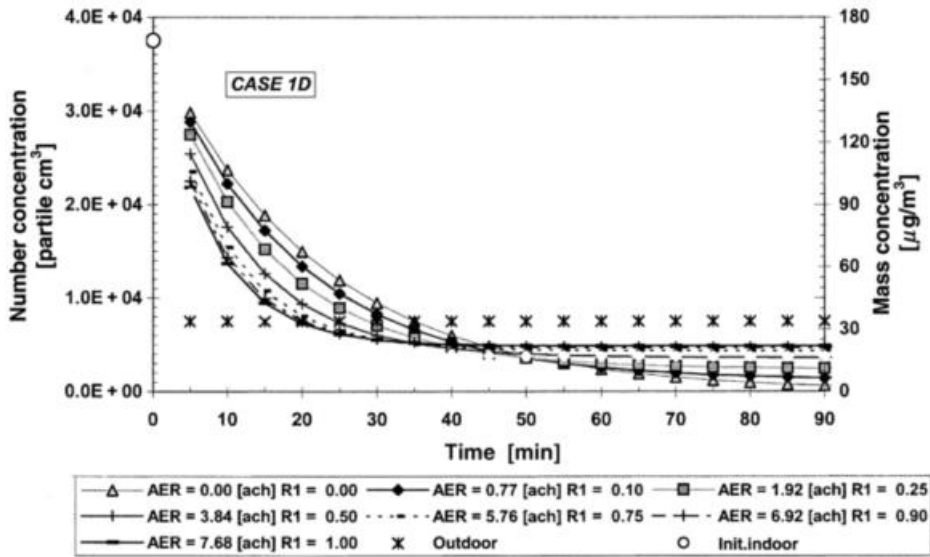
58 Howard-Reed C, Wallace L, Emmerich S. Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particles produced by indoor sources in an occupied townhouse. Atmospheric Environment. 2003;37:5295-5306.

59 Jamriska M, Morawska L, Ensor D. Control strategies for sub-micrometer particles indoors : model study of air filtration and ventilation. Indoor air. 2003;96-105.

의 (a)와 같이 유리할 수도 있고, (b)과 같이 불리할 수도 있음을 밝혔다.



(a)



(a)

Fig. 2.11 Indoor particle concentration simulated for static mode (a) outdoor concentration >> indoor concentration and (b) outdoor concentration << indoor concentration⁵⁹

Zuraimi⁶⁰는 CO₂와 같이 실내에서 주로 발생하는 오염물질의 농도를 함께 비교하여 외기 농도가 높을 때, 환기량이 줄면 실내의 PM_{2.5}의 농도는 줄어들 수 있으나, CO₂의 농도가 증가할 수 있음을 밝혔다.

이상의 연구들은 미리 정해진 제어방식 또는 운전 방식에 따른 실내 미세먼지 농도의 개선효과를 비교한 연구로서, 실내 미세먼지 농도를 개선시키기 위해 요구되는 제어 모드의 안을 제시하는 것에 도움이 될 수 있으나 실제로 변화하는 실내외 미세먼지 환경에 대응하여 제어하는 것에는 한계가 있다.

2.3.2 환경 대응형 ventilation과 filtration 제어 연구

2.3.2.1 환경조건에 따른 제어량 결정방법 제시 연구

Hänninen⁶¹의 연구에서는 실제 제어를 위한 모델이 제시되지는 않았지만 실내의 발생원이 주요 원인인 오염물질과 실외의 발생원이 주요 원인인 오염물질을 동시에 제어해야 하는 경우 optimum ventilation rate의 개념을 Fig. 2.12와 같이 제시하였다.

60 Zuraimi M, Tham K, Chew F, Ooi P. The effect of ventilation strategies of child care centers on indoor air quality and respiratory health of children in Singapore. Indoor air. 2007;317–327.

61 Hänninen, O;Asikainen A. Efficient reduction of indoor exposures indoor exposures; Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls. National Institute for Health and Welfare. 2013.

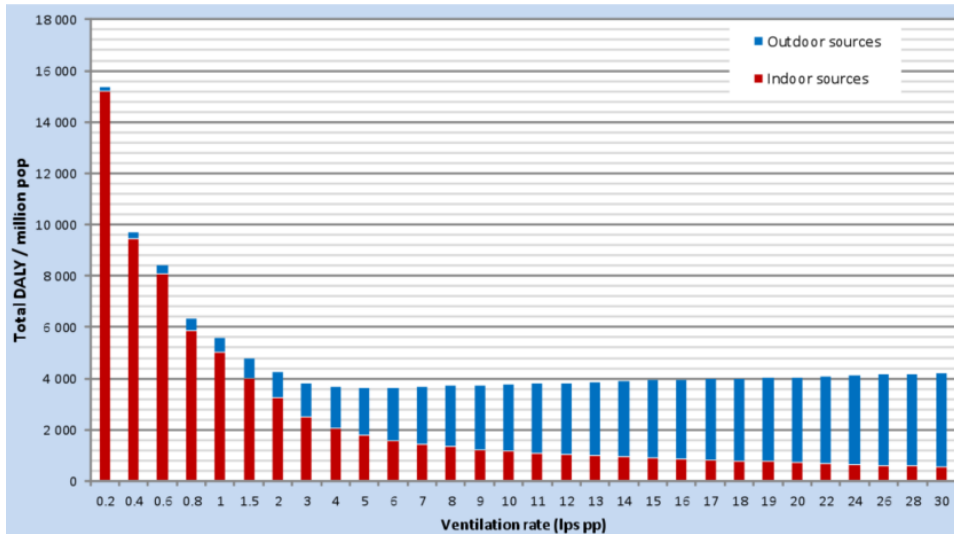


Fig. 2.12 Optimum ventilation level to control pollutants which are one is from outdoor sources and the other is from indoor sources⁶²

Liu⁶³는 변화하는 실외 PM_{10} 농도에 따라 지하철 플랫폼의 농도를 목표 농도($=60\mu g/m^3$)이하로 유지하는 동시에 요구되는 팬동력 에너지가 최소가 되는 환기량을 결정할 수 있도록 최적 제어 모델을 제시하였다.

이상의 연구들은 실내 미세먼지 농도 관리를 위해 변화하는 실내외 환경조건에 따라 최적화를 통해 Ventilation 제어량을 결정하는 전략을 제시하였으나, 실내 농도 증가의 원인이 실외 또는 실내 한쪽으로 정해져 있는 오염물질을 대상으로 하고 있어 환경조건에 따라서 원인이 실외가 될 수도 있고 실내가 될 수도 있는 $PM_{2.5}$ 의 경우에는 적용하기가 어렵다.

62 Ibid.

63 Liu H, Lee S, Kim M, Shi H, Tai J, Wasewar KL, et al. Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system. Energy & Buildings. 2013;66:553-561.

2.3.2.2 환경조건에 따른 제어모드 결정방법 제시 연구

배상환⁶⁴의 연구에서는 변화하는 실외 미세먼지 환경조건에 따라 제어모드를 결정할 수 있는 전략을 제시하였다. 실외 미세먼지 농도가 특정 농도 이하일 때만 Ventilation 제어를 하고 특정 농도 이상이 되면 외기 도입을 차단시키고 Filtration 제어를 함으로써 변화하는 실외 환경조건에 대응한 모드 결정이 가능하다. 이러한 제어방식은 실외 농도를 제어 결정 인자로 하여 외기 도입 유무를 판단 함으로써 간단한 제어가 가능하나 실내 미세먼지 환경조건이 고려되지 않아 Ventilation 제어를 활용하는데 소극적이고, Ventilation과 Filtration의 제어량을 결정할 수 없다는 한계점을 갖는다.

2.3.2.3 환경조건에 따른 제어모드, 제어량 결정방법 제시 연구

Han⁶⁵의 연구에서는 미세먼지를 대상으로 진행된 연구는 아니지만 외기의 HCHO의 농도에 따라 Ventilation 제어를 할 것인지 Filtration 제어를 할 것인지 제어 모드를 결정하고, 환기에 의해 발생하는 냉난방 에너지를 줄이기 위하여 변화하는 외기온에 따라 Ventilation flow rate를 결정할 수 있는 제어 전략을 제시하였다.

즉, OA Temp>20℃ 또는 OA Temp<1.7℃ 일 때, 외기의 HCHO 농도에

64 배상환, 정민호. 공기청정 기능을 가지는 공동주택 환기시스템. 건축환경설비. 2017;11:23-30.

65 Han K, Zhang JS, Guo B. A novel approach of integrating ventilation and air cleaning for sustainable and healthy office environments. Energy & Buildings. Elsevier B.V.; 2014;76:32-42.

따라 $0 \leq C_{out,HCHO} < 1\text{ppb}$ 일 때는 ASHRAE에서 제시하는 최소환기량으로 Ventilation 제어를 실시하고, $1 \leq C_{out,HCHO} < 6\text{ppb}$ 일 때는 환기량을 50% 줄이고, $C_{out,HCHO} > 6\text{ppb}$ 일 때는 외기도입없이 Filtration 제어만 한다. $5.6^{\circ}\text{C} \leq \text{OA Temp} \leq 18.3^{\circ}\text{C}$ 이면, 환기량을 2배~3배정도 증가 시키고, 외기 HCHO 농도에 따라 Filtration 제어를 실시한다. $1.7^{\circ}\text{C} \leq \text{OA Temp} < 5.6^{\circ}\text{C}$ 또는 $18.3^{\circ}\text{C} < \text{OA Temp} \leq 20^{\circ}\text{C}$ 이면, 최소환기량으로 Ventilation 제어를 실시하고 외기 HCHO 농도에 따라 Filtration 제어를 실시한다.

해당 연구의 경우, 변화하는 외부의 오염물질 농도와 외기온에 따라 Ventilation 제어와 Filtration 제어 모드를 결정하고 Ventilation 제어량을 결정할 수 있는 제어를 제시하였다 그러나 제어 모드는 실외 농도에 의해서만 결정되고, 제어량은 전적으로 에너지에 의해 결정된다. 이러한 제어 방식은 실외 유입이 실내 농도 증가의 원인인 경우에는 적용가능하나 $\text{PM}_{2.5}$ 와 같이 실외와 실내 모두에 증가 원인이 있고, 실내 농도의 증가에 대한 기여도가 계속적으로 역전되는 오염물질에 대해서는 적용하기가 어렵다.

이상에서 살펴본 Ventilation 제어와 Filtration 제어와 관련된 기존 연구에서 실내 미세먼지 농도 제어를 위해 어떠한 인자가 고려 되었는지를 요약하면 Table 2.5와 같이 정리할 수 있다.

Table 2.5 Precedent studies: What is considered for control of indoor particle concentration.

Researched by	Ventilation control						+	Filtration control				
	Particle			Energy		Other indoor pollutants		Outdoor air cooling	Particle			Energy
	C_{out}	G	C_{in}	Fan E	H&C E				C_{in}	G	C_{out}	Fan E
Fisk												O
Howard-Reed		O										
Jamriska	O		O					O		O		
Zuraimi	O		O			O						
Hänninen	O ^R		O ^R			O ^R						
Liu	O ^R			O ^R								
Bae	O ^M					O ^M		C		O ^M		
Han					O ^R	O ^{M,R}		C				

O: Considered for factor analysis, O^M: Considered to determine control mode, O^R: Considered to determine control flow rate, O^{M,R}: Considered to determine both control mode and flow rate, C: Ventilation control coupled with filtration control

2.4 소 결

본 장에서는 미세먼지의 특성 및 인체 위해성을 살펴보고, 실내 미세먼지 농도 형성 메커니즘과 농도 형성에 영향을 미치는 인자를 고찰하였다. 실내 미세먼지 농도 영향 평가를 위해서 측정과 모델링을 통해 농도를 평가하는 방법들을 고찰하고 분석하였다. 아울러 본 논문의 구체적인 연구 내용 전개에 대한 근거 자료를 마련하기 위해, 실내 미세먼지 농도 제어관련 기존 연구들을 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내 미세먼지 농도 형성에 영향을 미치는 과정은 실내외 공기 교환, 실내 미세먼지 발생, 실내 미세먼지 제거 과정으로 구분된다. 이 중 실내 미세먼지의 증가는 실외 미세먼지의 실내 유입과 실내 미세먼지 발생이다. 따라서, 실내 미세먼지 농도 영향 평가 및 제어 방안의 수립을 위해서는 실외 유입 조건과 실내 발생 조건이 모두 고려되어야 한다.
- (2) 실내 미세먼지 농도는 실외농도, 침투계수, 침기율, 침착계수, 실내 미세먼지 발생율과 같이 실내외 환경 또는 건물 환경과 관련된 인자와 제어 시스템의 풍량, 효율과 같은 제어 가능한 인자의 영향을 받는다. 환경조건들의 변화와 시스템 제어 조건에 따라 실내 미세먼지 농도가 어떻게 달라지는지 파악하여 효과적인 제어방안을 모색해야 한다.

- (3) 실내 미세먼지 농도 영향 평가방법으로는 크게 측정에 의한 평가방법과 모델링을 이용한 시뮬레이션 평가방법이 있다. 측정에 의한 평가방법은 실험 환경 조건에 대해서는 현실과 유사한 데이터를 제공할 수 있으나, 여러 영향 인자들에 따른 실내 농도 변화를 명확히 밝히기 위해서는 수많은 실험이 요구되므로 시간과 비용의 한계를 갖는다. 따라서 실험으로 검증된 모델링을 통한 시뮬레이션 연구가 진행될 필요가 있다.
- (4) 실내 미세먼지 농도 관리를 위한 기존의 Ventilation 제어 또는 Filtration 제어 연구를 분석한 결과, 초기에는 주로 실내외 미세먼지 환경조건과 상관없이 미리 정해진 (prescribed) 규칙에 따라 제어를 했을 경우, 제어 방식에 따른 실내 미세먼지 농도 개선 효과 등을 비교하는 연구가 제시되었다. 이후, 변화하는 환경조건에 따라 제어 모드 또는 제어량 결정 방법을 제시하는 연구가 진행되었으나, 주로 실외 농도만을 제어 결정 인자로 하여 Ventilation 제어를 결정함으로써 실내 미세먼지 환경조건에 대한 고려가 상대적으로 미진하다. 또한, 미세먼지 제어시 발생할 수 있는 기타 다른 실내 발생 오염물질의 관리문제를 함께 고려하거나, 실내 미세먼지 농도와 에너지를 최적화한 연구가 진행된 바 있으나 셋을 통합한 연구는 아직 미비하다.

제 3 장

실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 해석모델

- 3.1 실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 해석이론
 - 3.2 영향인자 도출 및 해석모델 구축
 - 3.3 현장실험을 통한 해석모델 검증
 - 3.4 소 결
-

실내외 미세먼지 환경조건에 따라 변화되는 실내 농도를 예측하고 목표 실내 농도를 유지하기 위한 Ventilation과 Filtration의 제어모드와 제어량을 결정하기 위해서는 계속적으로 변하는 미세먼지 침투와 발생량을 해석하고, 그에 따른 Ventilation과 Filtration의 실내 미세먼지 농도 제어효과를 파악 할 수 있는 모델링이 필요하다. 이를 위해 본 장에서는 해석 관련 이론들을 고찰하여 Ventilation과 Filtration 제어에 따른 실내 미세먼지 농도를 해석할 수 있는 모델과 실내 미세먼지 발생을 파악할 수 있는 모델을 구축하였다. 다음으로 현장실험에 의해 환기 시스템과 공기청정기의 운전 조건에 따른 실내 미세먼지 농도를 측정하고, 이 측정값과 구축된 모델을 이용하여 획득한 예측값을 비교하여 모델의 검증을 실시하였다.

3.1 실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 해석이론

3.1.1 실내 미세먼지 농도 해석이론

2.1절에서 고찰한 것과 같이 실내 미세먼지 농도는 실내외 간의 미세먼지의 유입 또는 유출과 실내에서의 미세먼지 제거 또는 발생에 의해 결정된다. 미세먼지의 실내 유입과 유출, 실내 미세먼지 제거와 발생은 다양한 인자의 영향을 받기 때문에 이를 해석하기 위해서는 목적에 따라 적합한 해석방법을 적용하여야 한다. 이에 따라 적합한 해석방법을 선택하기 위한 모델을 고찰하였다.

3.1.1.1 미세먼지의 실내 유입, 유출

미세먼지의 실내 유입과 유출은 침기, 자연환기, 그리고 기계환기의 세 가지 공기 이동 경로를 통해 발생한다. 이 중 침기와 자연환기에 의한 미세먼지의 유입은 특정 농도를 갖는 외기가 특정 유량으로 건물의 crack 또는 창문을 통과하면서 공기중에 포함된 미세먼지의 일부가 제거되고 나머지가 실내로 들어오는 과정이다. 침기 또는 자연환기에 의한 실내 미세먼지 유출입 과정은 식 (3.1)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dC_{in,inf}}{dt} = P\lambda C_{out} - \lambda C_{in} \quad (3.1)$$

여기서,

$\frac{dC_{in,inf}}{dt}$: Change rate of indoor particle concentration due to infiltration/exfiltration process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

λ : Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
 P : Penetration coefficient [—]

식 (3.1)을 이용하기 위해서는 침투계수 P 를 결정하는 것이 매우 중요하다. P 는 crack의 길이와 높이, 세부적인 형태, 표면의 상태와 같은 crack의 속성과 함께 미세먼지의 직경, 밀도와 같이 통과하는 미세먼지에 따라서도 영향을 받으며 온도, 압력차와 같은 환경적인 조건에 의해서도 영향을 받는다. 특정 crack에 대하여 침투계수를 구할 수 있는 모델이 제안되었으며^{66,67}, 식 (3.2)와 같다.

$$P_t = P_g \times P_d \times P_i \quad (3.2)$$

$$P_g = 1 - \frac{l V_s}{h U_m}$$

$$P_d = 0.915e^{-1.885\varphi} + 0.0592e^{-22.3\varphi} + 0.026e^{-152\varphi}$$

$$\varphi = \frac{4 \times D \times l}{h^2 \times U_m}$$

$$P_i = f(\sqrt{Stk}), \quad Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U_m C_c}{9\mu h}$$

여기서,

P_t : Total penetration coefficient [—]
 P_g : Penetration coefficient due to gravitational settling [—]
 P_d : Penetration coefficient through a crack considering Brownian diffusion [—]
 P_i : Penetration coefficient associated with impaction [—]
 l : Crack length [m]

66 Liu D, Nazaroff W. Modeling pollutant penetration across building envelopes. 2001;35:4451–4462.

67 Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I / O ratio , in filtration factor and penetration factor. Atmospheric Environment. 2011;45:275–288.

h	: Crack height [m]
V_s	: Particle settling velocity [m/s]
U_m	: Mean air speed in the crack [m/s]
D	: Particle diffusion coefficient [m^2/s]
Stk	: Stokes number [-]
ρ_p	: Particle density [kg/m^3]
d_p	: Particle diameter [m]
C_c	: Cunningham coefficient [-]
μ	: Molecular dynamic viscosity of air [$kg \cdot s/m$]

식 (3.2)에 제시된 모델을 이용하면 crack 내부의 미세먼지 침착 현상에 영향을 주는 여러 인자의 변화에 따라 침투계수를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 지금까지는 특정한 형상(straight-through⁶⁸, L-shaped⁶⁹, double-bend⁷⁰ 등)에 대해서만 검증되어 있어 복잡한 형상의 crack이 다수 존재하는 실제 건물에서의 침투계수를 구하는 것에는 한계가 있다.

기존의 많은 연구들이 실내외 농도 및 환기율을 측정하여 식 (3.3)에 의해 간접적으로 P 를 구하는 방법을 사용하고 있으며, 여러 번 측정하여 오차를 줄임으로써 실내농도 해석에 대체로 타당한 결론을 얻고 있다.

$$P = \frac{\lambda + k}{\lambda} \cdot \frac{C_{in,ss}}{C_{out}} \quad (3.3)$$

여기서,

P : Penetration coefficient [-]

68 Zhao B, Chen C, Yang X, Lai A. Comparison of three approaches to model particle penetration coefficient through a single straight crack in building envelopes. Aerosol Science and Technology. 2010;44:405-416.

69 Jeng C, Kindzierski WB, Smith DW. Particle Penetration through Inclined and L -Shaped Cracks. 2007;133:331-339.

70 Liu D, Nazaroff W. Modeling pollutant penetration across building envelopes. 2001;35:4451-4462.

λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
$C_{in,ss}$: Indoor particle concentration at steady state [$\mu g/m^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu g/m^3$]

기계환기 의한 미세먼지의 실내 유입은 특정 농도를 갖는 외기가 정해진 환기량으로 기계환기 시스템을 통과하면서 공기중에 포함된 미세먼지의 일부가 필터에 의해 제거되고 나머지가 실내로 들어오는 과정이다. 기계환기에 의한 실내 미세먼지 유출입 과정은 식 (3.4)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dC_{in,vent}}{dt} = (1 - \eta_v) \frac{Q_v}{V} C_{out} - \frac{Q_v}{V} C_{in} \quad (3.4)$$

여기서,

$\frac{dC_{in,vent}}{dt}$: Change rate of indoor particle concentration due to ventilation process [$\mu g/m^3 h$]
C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
η_v	: Particle removal efficiency of the ventilation system [-]
Q_v	: Ventilation airflow rate [m^3/h]
V	: Room volume [m^3]

3.1.1.2 실내 미세먼지 제거, 발생

미세먼지의 실내 제거는 크게 두 방법으로 이루어진다. 하나는 실내 벽면, 천장, 바닥과 같은 건축 표면과 가구 등을 포함하는 실내의 모든 표면에 중력 또는 브라운 확산 등에 의해 침착되어 패시브하게 실내 공기의 미세먼지가 제거되는 것이다. 다른 하나는 공기청정기와 같은 기계적인 시스템에 의해 액티브하게 실내 공기의 미세먼지를 제거하는 방법이다.

침착에 의한 미세먼지 제거는 특정 농도를 갖는 실내 농도가 특정 속도로 실내 표면에 쌓이는 과정으로 식 (3.5)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{dC_{in,dep}}{dt} = kC_{in} \quad (3.5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \frac{dC_{in,dep}}{dt} &: \text{Change rate of indoor particle concentration due to deposition process} \\ &\quad [\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}] \\ C_{in} &: \text{Indoor particle concentration } [\mu\text{g}/\text{m}^3] \\ k &: \text{Deposition rate } [\text{h}^{-1}] \end{aligned}$$

식 (3.5)를 이용하기 위해서는 침착계수 k 를 결정하는 것이 매우 중요하다. k 는 침착표면의 표면상태, 면적과 같은 표면의 속성과 함께 미세먼지의 직경, 밀도의 영향을 받으며 실내기류속도, 실부피와 같은 실내 환경에 의해서도 영향을 받는다. 침착계수를 구할 수 있는 모델이 제안 되었으며^{71,72}, 식 (3.6)와 같다.

$$k = V_d \frac{A}{V} \quad (3.6)$$

$$V_d = V_s + \frac{1}{r_a + r_s}$$

$$V_s = f(d_p, \rho_d)$$

$$r_a = f(U_*)$$

71 Nho-Kim E, Michou M, Peuch V. Parameterization of size-dependent particle dry deposition velocities for global modeling. Atmospheric Environment. 2004;38:1933–1942.

72 Zhang L, He Z. Technical Note : An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles. Atmospheric Chemistry and Physics. 2014;14:3729–3737.

$$r_s = f(U_*)$$

여기서,

k	: Deposition rate [s^{-1}]
V_d	: Deposition velocity [m/s]
V	: Room volume [m^3]
A	: Deposition area [m^2]
V_s	: Particle settling velocity [m/s]
r_a	: Aerodynamic resistance [s/m]
r_s	: Surface resistance [s/m]
d_p	: Particle diameter [m]
ρ_d	: Particle density [kg/m^3]
U_*	: Friction velocity [m/s]

식 (3.6)에 제시된 모델을 이용하면 실내 표면으로의 미세먼지 침착 현상에 영향을 주는 여러 인자의 변화에 따라 침착계수를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 다양한 재질로 이루어진 수많은 실내 표면의 침착계수를 구하는 것에는 한계가 있다.

기존의 많은 연구들이 실내외 농도 및 환기율을 측정하여 실내 농도 감쇄구간에서 식 (3.7)의 그래프와 실험값의 curve fitting을 통해 k 를 구하는 방법을 사용하고 있으며, 여러 번 측정하여 오차를 줄임으로써 실내 농도 해석에 타당한 결론을 얻을 수 있다.

$$\ln(C_{in} - C_{in,ss}) = -\varphi \cdot t + \ln(C_{in,ini} - C_{in,ss}) \quad (3.7)$$

$$\varphi = \lambda + k$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
$C_{in,ss}$: Indoor particle concentration at steady state [$\mu g/m^3$]
$C_{in,ini}$: Indoor particle concentration at time 0 [$\mu g/m^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
t	: Time [h]

공기청정 시스템에 의한 실내 미세먼지의 제거는 특정 농도를 갖는 실내공기가 정해진 풍량으로 공기청정 시스템을 통과하면서 시스템에 내장된 필터에 의해 미세먼지가 걸러지는 과정이다. 공기청정 시스템에 의한 실내 미세먼지 제거 과정은 식 (3.8)로 표현할 수 있다.

$$\frac{dC_{in,filt}}{dt} = \eta_f \frac{Q_f}{V} C_{in} \quad (3.8)$$

여기서,

$\frac{dC_{in,filt}}{dt}$: Change rate of indoor particle concentration due to filtration process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
η_f	: Particle removal efficiency of the filtration system [-]
Q_f	: Filtration airflow rate [m^3/h]
V	: Room volume [m^3]

2.1절에서 고찰한 바와 같이 미세먼지의 실내 발생은 실내의 다양한 미세먼지 발생원으로부터 특정 발생율을 가지고 미세먼지가 생성되는 과정이며, 식(3.9)로 표현할 수 있다

$$\frac{dC_{in,g}}{dt} = \frac{G}{V} \quad (3.9)$$

여기서,

$\frac{dC_{in,g}}{dt}$: Change rate of indoor particle concentration due to indoor generation process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
G	: Indoor generation rate [$\mu\text{g}/\text{h}$]
V	: Room volume [m^3]

3.1.2 실내 미세먼지 발생 예측 해석이론

미세먼지의 실내 발생은 직접 발생원으로부터 생성되거나 실내 표면에 침착되어 있던 미세먼지가 거주자의 움직임에 의해 재부유되는 현상이다. 실내 미세먼지 재부유 과정은 식 (3.10)으로 표현할 수 있으며, 식에 포함된 재부유율(r : resuspension rate)은 식 (3.11)에 의해 결정할 수 있다.

$$\frac{dC_{in,res}}{dt} = rA_rC_{floor} \quad (3.10)$$

$$r = \frac{V}{A_rC_{floor}} \left(\frac{dC_{in}}{dt} + (\lambda + k)C_{in} \right) \quad (3.11)$$

여기서,

$\frac{dC_{in,res}}{dt}$: Change rate of indoor particle concentration due to resuspension process [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$]
C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{floor}	: Floor loading [$\mu\text{g}/\text{m}^2$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
r	: Resuspension rate [h^{-1}]
A_r	: Resuspension surface area [m^2]
V	: Room volume [m^3]

재부율을 결정하기 위해서는 재부유 면적(A_r : Resuspension surface area)과 시간에 따라 변화하는 침착면 미세먼지 농도(C_{floor} : Floor loading)를 알아야 한다. 그러나 실제 건물에서 침착면의 미세먼지 농도를 파악하는 것은 매우 어려운 일이다.

직접 발생원으로부터의 발생은 발생원의 종류에 따라 발생에 영향을 미치는 인자가 다르고, 물리적 현상이 규명되지 않아 일반적으로 적용되

고 있는 모델이 아직까지 없는 실정이다. 따라서, 실내 미세먼지 발생을 파악하기 위하여 많은 연구들이 실내외 농도 및 환기율을 측정하여 식 (3.12)에 의해 간접적으로 발생을 G 를 구하는 방법을 사용하고 있다.

$$G = V(\lambda + k) \cdot \left(\frac{C_{in} - C_{ini}e^{-(\lambda+k)t}}{(1 - e^{-(\lambda+k)t})} - \frac{\lambda \cdot P}{\lambda + k} C_{out} \right) \quad (3.12)$$

여기서,

G	: Indoor generation rate [$\mu\text{g}/h$]
C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/m^3$]
$C_{in,ini}$: Indoor particle concentration at time 0 [$\mu\text{g}/m^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/m^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [—]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
V	: Room volume [m^3]
t	: Time [h]

3.2 영향인자 도출 및 해석모델 구축

3.1절에서 실내 미세먼지 농도 및 실내 방출 모델 작성을 위한 예비적 고찰을 수행하였으며, 이 중 본 연구의 목적에 부합하는 해석이론을 선정하였다. 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 인자들 사이의 관계 및 모델에 최종 고려된 인자 (pink circle in Fig. 3.2)를 Fig. 3.1에 도식화 하였으며, 본 연구에 적용된 실내 미세먼지 농도 해석 모델과 발생량 해석 모델은 다음 식 (3.13)과 식 (3.14)와 같다.

$$\frac{dC_{in}}{dt} = P\lambda C_{out} + (1 - \eta_v) \frac{Q_v}{V} C_{out} + \frac{G}{V} - \lambda C_{in} - \frac{Q_v}{V} C_{in} - k C_{in} - \eta_f \frac{Q_f}{V} C_{in} \quad (3.13)$$

$$G = V\varphi \cdot \left(\frac{C_{in} - C_{in,ini}e^{-\varphi t}}{(1 - e^{-\varphi t})} - \frac{\left(\frac{Q_v}{V}(1 - \eta_v) + P\lambda\right)}{\varphi} C_{out} \right), \quad \varphi = \frac{Q_v}{V} + k + \lambda + \eta_f \frac{Q_f}{V} \quad (3.14)$$

여기서,

C_{in}	: Indoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
C_{out}	: Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
$C_{in,ini}$: Indoor particle concentration at time 0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
λ	: Infiltration/Exfiltration rate [h^{-1}]
P	: Penetration coefficient [—]
η_v	: Particle removal efficiency of the ventilation system [—]
η_f	: Particle removal efficiency of the filtration system [—]
Q_v	: Ventilation airflow rate [m^3/h]
Q_f	: Filtration airflow rate [m^3/h]
G	: Indoor generation rate [$\mu\text{g}/\text{h}$]
k	: Deposition rate [h^{-1}]
V	: Room volume [m^3]
t	: Time [h]

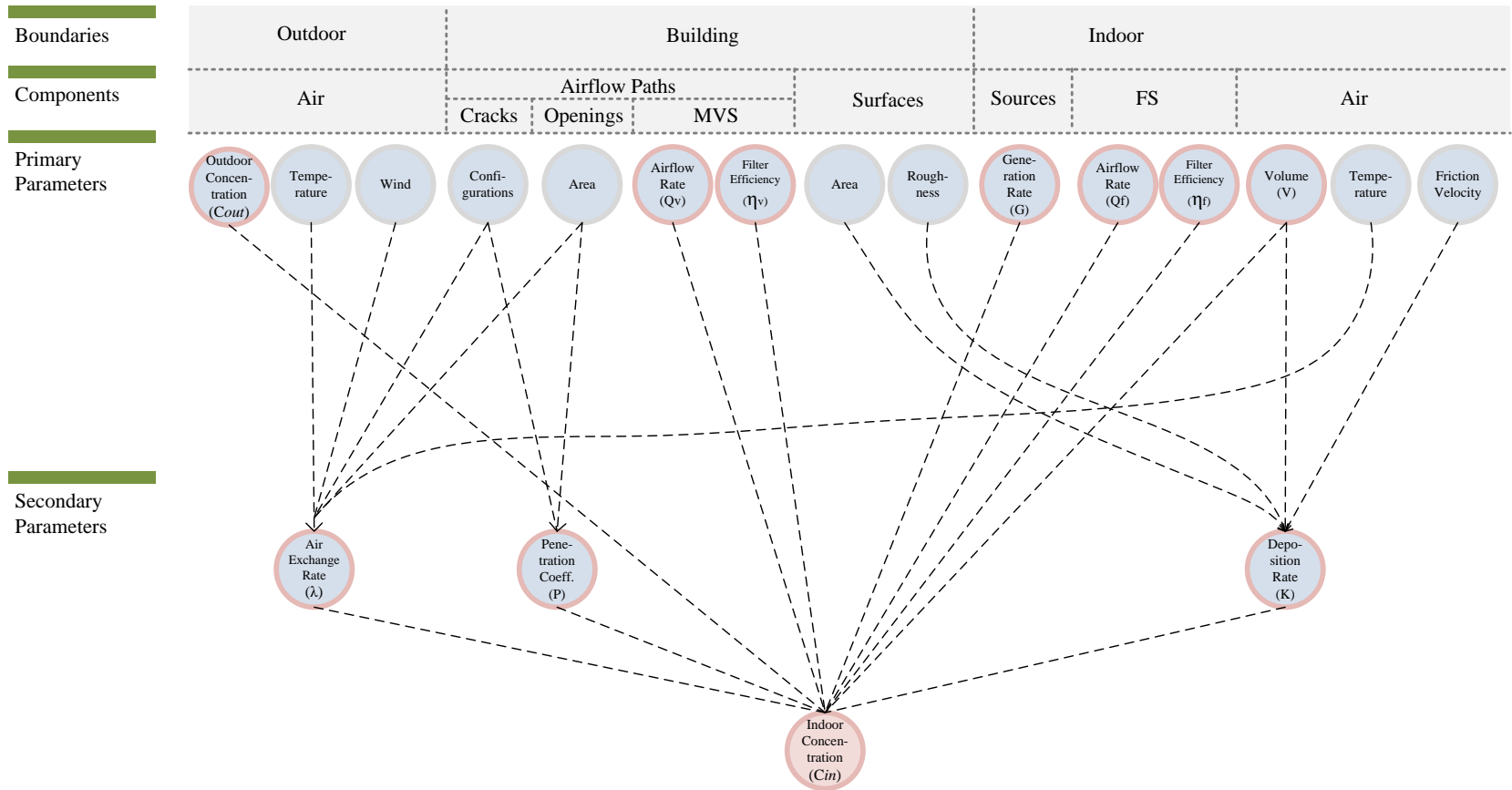
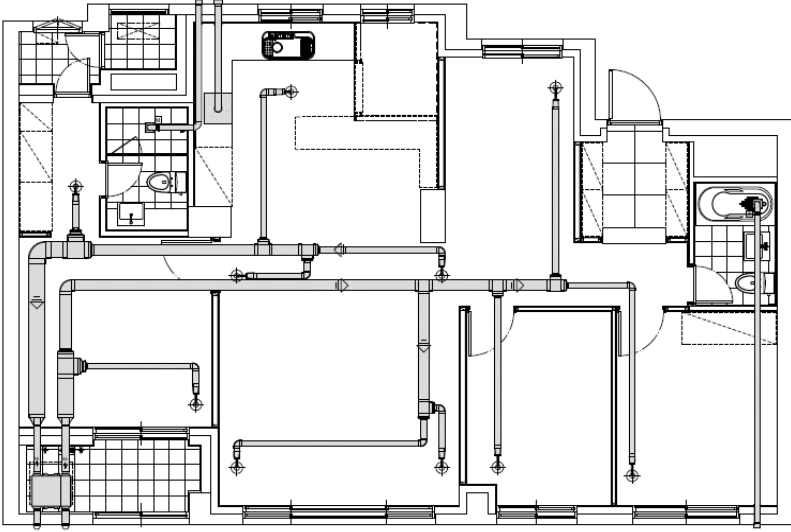


Fig. 3.1 Parameters of indoor particle concentration

3.3 현장실험을 통한 해석모델 검증

해석모델의 검증을 위해 Table 3.1과 같이 국내 공동주택에서 가장 일반적인 규모인 전용면적 84m²의 단위 세대를 선정하여 검증 실험을 진행하였다. 대상 세대는 거실 발코니를 확장하여 2중창이 설치되어 있으며, 세대 환기를 위하여 200 m³/h 풍량의 전열교환 환기시스템이 적용되어 있다. 실내 마감은 공동주택에 일반적으로 사용되고 있는 실크벽지와 온돌마루로 시공되었다.

Table 3.1 Description of a test room

		
Floor area	84 m ²	
Ventilation system	Type	Heat recovery ventilator
	Flow rate	200 m ³ /h
Experiment duration	2017. 07.04~07.23	

해석모델은 실제 환경 및 시스템 운전 조건을 반영했을 때, 실제와 유사한 결과를 예측할 수 있다. 따라서 건물의 환경 및 시스템 운전 조건을 정확하게 반영하기 위한 계수획득 실험이 선행되었다. 다음으로 추정된 계수와 측정된 실외 농도 및 환기율을 입력값으로 실내 미세먼지 농도를 시뮬레이션한 예측치를 측정값과 비교하여 실내 미세먼지 농도해석부를 검증하였다. 마지막으로 동일한 실내 발생 실험을 수회 수행한 후, 실험 값을 바탕으로 계산된 발생을 값을 서로 비교함으로써 실내 미세먼지 발생량 해석부를 검증하였다. 이와 같은 검증 절차를 도식화하면 Fig. 3.2와 같다.

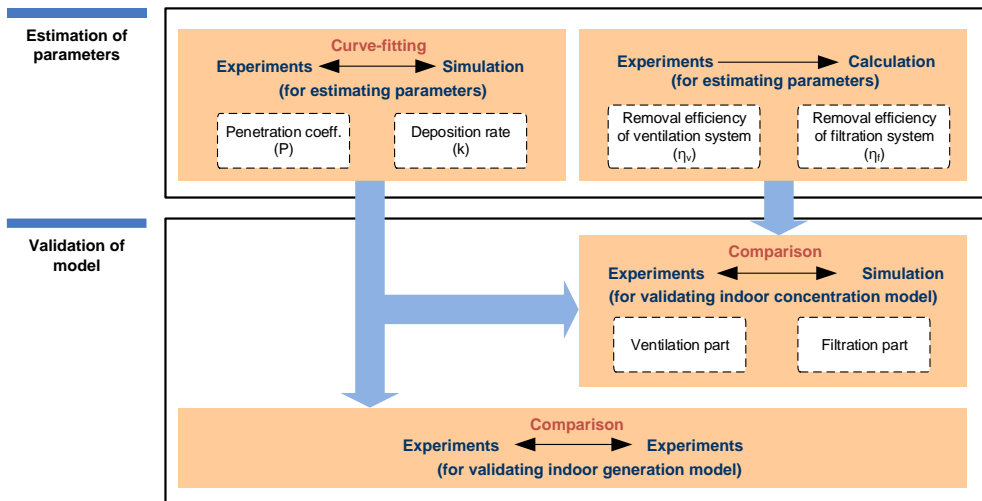


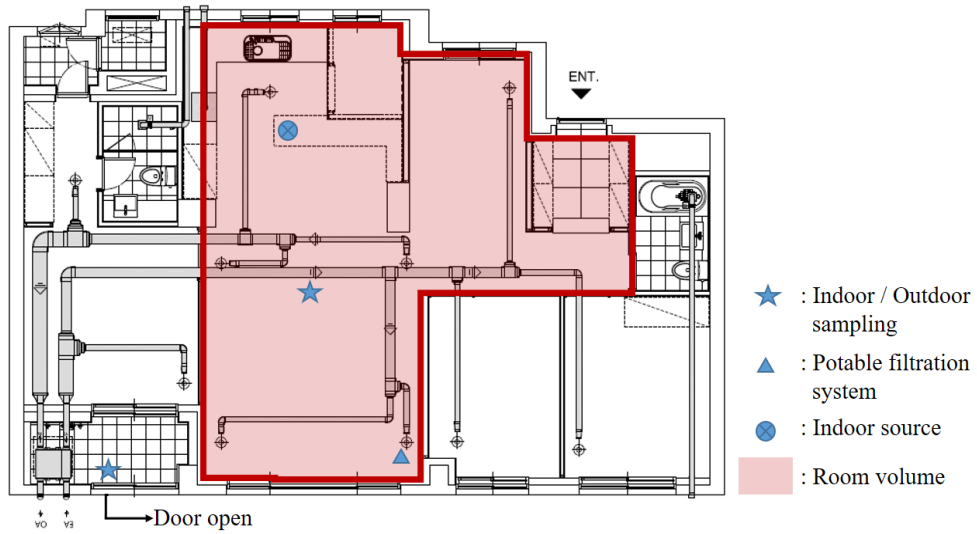
Fig. 3.2 Validation process of the simulation model

3.3.1 해석모델의 계수 추정

해석모델에 필요한 계수는 건물 환경 성능과 관련된 계수와 제어 시스템 성능과 관련된 계수로 나눌 수 있다. 건물 환경 성능과 관련된 계수는 건물 외피의 미세먼지 침투 성능을 나타내는 침투계수(P)와 실내 공간의 미세먼지 제거 성능을 나타내는 침착계수(k)다. 미세먼지 제어 시스템 성능과 관련된 계수는 Ventilation 시스템과 Filtration 시스템의 미세먼지 제거 성능을 나타내는 각 시스템의 필터효율(η_v, η_f)이다.

3.3.1.1 침투계수(P)와 침착계수(k) 추정

실내외 미세먼지 농도 및 실내 환기율을 동시 측정을 통해 건물 환경 성능 계수인 P, k 를 구하였다. 실내외 미세먼지 농도는 미세먼지 개수 농도를 측정할 수 있는 장비(AeroTrak Handheld Particle Counter Model 9306, TSI, U.S.A.)와 질량 농도를 측정할 수 있는 장비(Sidepak personal aerosol monitor Model AM510, TSI, U.S.A.)를 이용하여 2분간격으로 농도 변화를 측정하였다. 실내 환기율은 Tracer gas 장비(Photoacoustic multi-gas monitor Model INNOVA 1314/1412, INNOVA AirTech Instruments, Denmark)를 이용하여 1분간격으로 측정하였으며, 추적가스로는 SF6가 활용되었다. 실내외 미세먼지 농도와 환기율을 측정한 위치 및 측정 모습은 Fig 3.3과 같다.



(a) Sampling location



(b) Sampling(indoor)



(c) Sampling(outdoor)

Fig. 3.3 Measurement of indoor, outdoor particle concentration and air exchange rate

실험에 앞서 실내에서 미세먼지를 발생시켜 실내 농도를 증가시킨 후, 발생원을 제거하는 과정을 진행하였다. 이는 실내 미세먼지 농도를 고농도로부터 자연감쇄 시킴으로써 실내 공간의 침착계수를 용이하게 산출하기 위함이다. 미세먼지 발생을 위하여 양초 4~7개를 5~10분간 연소시키고, 동시에 바닥의 미세먼지를 재부유 시켰다. 미세먼지를 발생시키는 동안 4개의 팬과 1m×1.2m 판넬을 이용하여 실내공기를 교반하여 well mixing이 되도록 하였다. 발생원 제거 후, 팬을 멈추고 실내외 미세먼지 농도와 환기율을 측정하였다.

침착계수 k 는 실내외 미세먼지 농도를 나타낸 Fig. 3.4의 그래프에서 실내 농도가 감소하는 구간(Decay part)의 데이터를 활용하여 식 (3.7)에 의해 구한다. Fig. 3.5와 같이 x축을 t , y축을 $\ln(C_{in} - C_{in,ss})$ 로 하는 그래프를 그린 후, curve fitting 하면, 추세선의 기울기가 대상 건물에서의 미세먼지 감쇄율이 된다. 감쇄율은 환기율에 침착계수를 더한 값이기 때문에, 동시 측정으로 획득한 환기율을 빼주면 침착계수(k)를 최종 구할 수 있다. 침투계수 P 는 Fig. 3.4의 그래프에서 실내 농도 정상상태 구간(Steady state part)의 데이터를 활용하여 식 (3.3)에 의해 구한다.

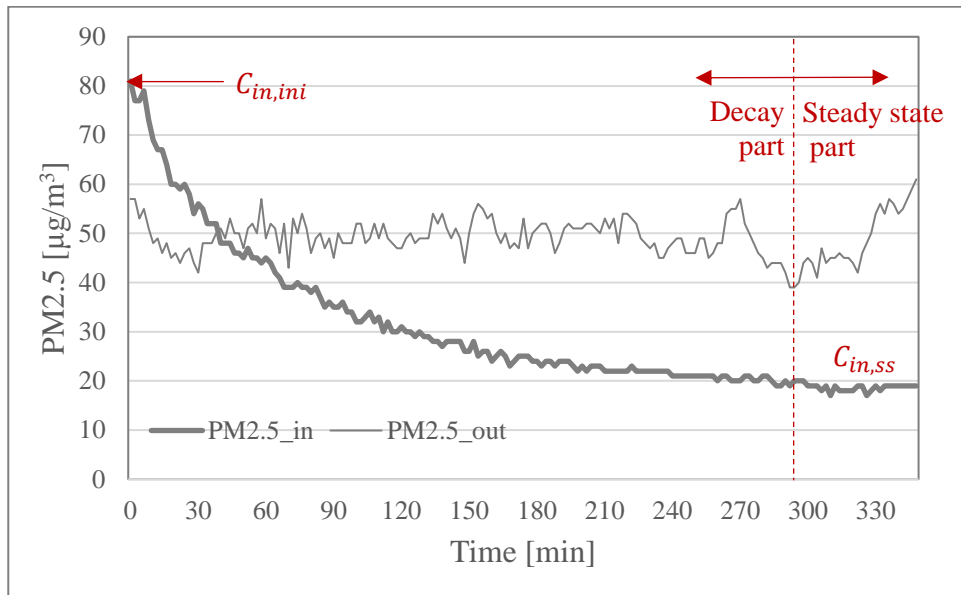


Fig. 3.4 An example of indoor and outdoor particle concentration for estimating parameter P and k

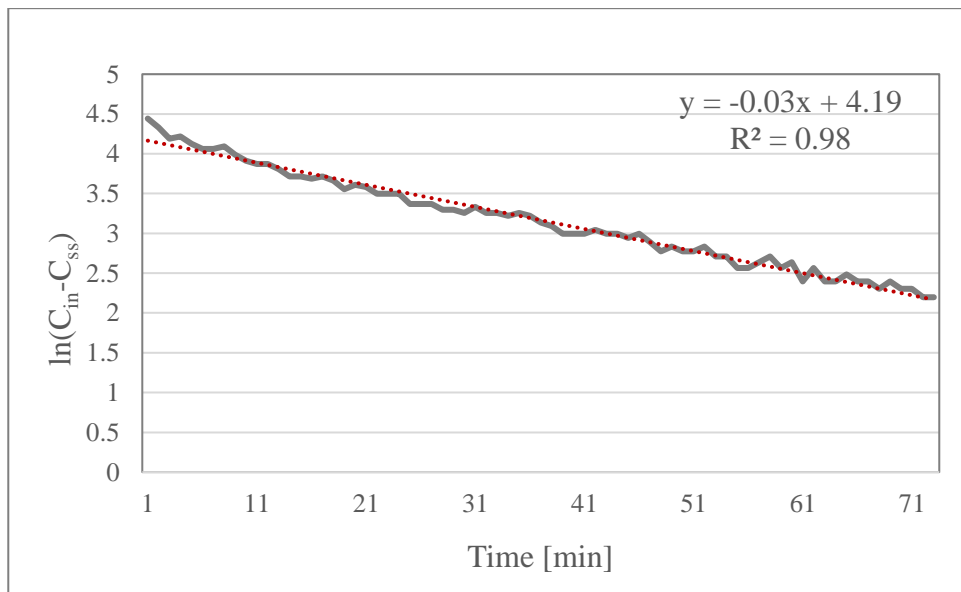


Fig. 3.5 Typical particle natural decay curve for estimating deposition rate (k)

3.3.1.2 Ventilation 시스템과 Filtration 시스템의 필터효율(η_v , η_f)

실외 미세먼지 농도와 Ventilation 시스템의 실내측 급기구에서 토출되는 공기의 농도를 측정하여 Ventilation 시스템의 미세먼지 제거 성능 계수인 η_v 를 구하였다(Fig 3.6). η_v 는 Ventilation 시스템의 풍량에 따라 달라질 수 있으므로 시스템 풍량을 Step 1부터 3까지 변화시키면서 측정을 진행하였다. Step 별 풍량은 Fig. 3.6과 같이 각 급배기구의 풍량을 측정 한 후, 합산하여 구했으며 Step 1이 $Q_v = 107 \text{ m}^3/\text{h}$, Step 2가 $Q_v = 121 \text{ m}^3/\text{h}$, Step 3가 $Q_v = 145 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 측정되었다. Ventilation 시스템의 미세먼지 제거성능 η_v 는 각 풍량별로 다음 식 (3.3)에 의해 구하였다.

$$\eta_v = 1 - \left(\frac{C_{outlet,vent}}{C_{inlet,vent}} \right) \quad (3.3)$$

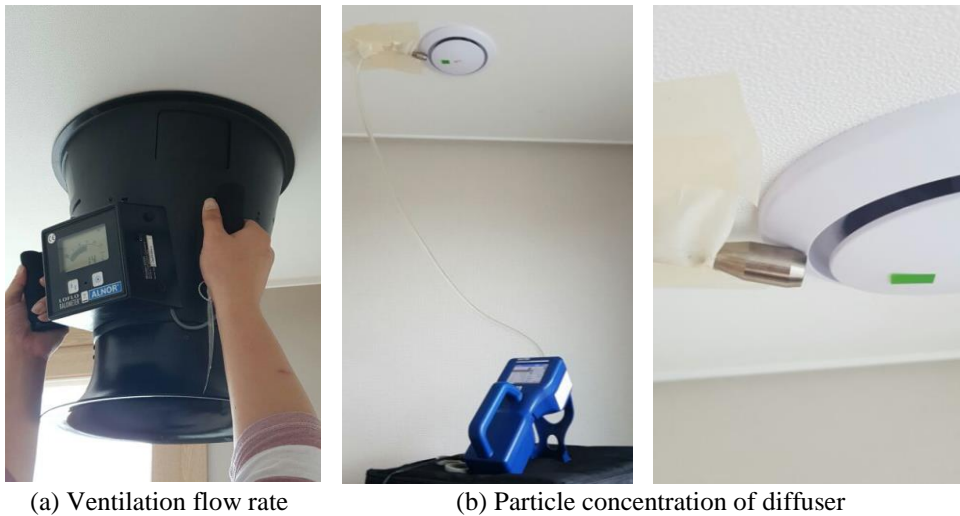


Fig. 3.6 Measurement of filter efficiency of ventilation system

실외 미세먼지 농도가 높은 날 실내의 모든 창문을 개방 시킨 상태에

서 실내 미세먼지 농도와 공기청정기 토출구 공기의 농도를 측정하여 Filtration 시스템의 미세먼지 제거 성능 계수인 η_f 를 구하였다(Fig 3.7). η_f 도 η_v 와 마찬가지로 Filtration 시스템 풍량을 Step 1부터 3까지 변화시키면서 측정을 진행하였다. 각 Step 별 풍량은 Step 1이 $Q_f = 125 \text{ m}^3/\text{h}$, Step 2가 $Q_f = 245 \text{ m}^3/\text{h}$, Step 3가 $Q_f = 305 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 측정되었다. Filtration 시스템 미세먼지 제거성능 η_f 는 각 풍량별로 다음 식에 의해 구하였다.

$$\eta_f = 1 - \left(\frac{C_{\text{outlet}, \text{filt}}}{C_{\text{inlet}, \text{filt}}} \right)$$

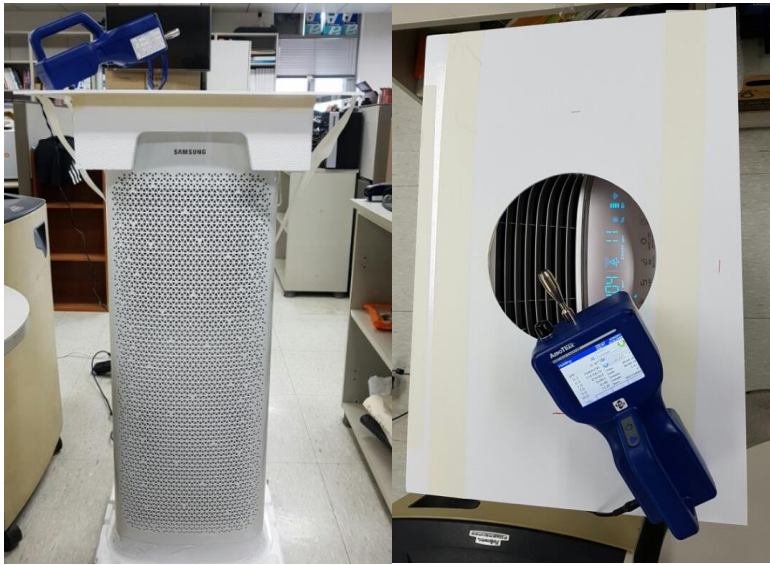


Fig. 3.7 Measurement of filter efficiency of filtration system

3.3.1.3 계수추정 실험 결과

건물 환경 성능 계수인 P , k 를 구하는 실험을 총 8회 진행하였으며, 그 결과는 Table 3.2와 같다. 침투계수 P 의 값은 침착계수 k 값에 비하여 산출된 값의 범위가 크게 나타났다. 해석모델에는 8회 측정결과의 산술 평균값($P = 0.7$, $k = 0.4$)이 적용되었다.

시스템 성능계수인 η_v 와 η_f 를 구하는 실험은 각 풍량 별로 30~60분간 진행하였으며, 그 결과는 Table 3.3과 같다.

Table 3.2 Results of estimating building parameters P and k

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	Average
P [-]	0.3	0.9	0.4	0.6	0.9	0.6	1.3	0.5	0.7
k [h-1]	0.3	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.2	0.4

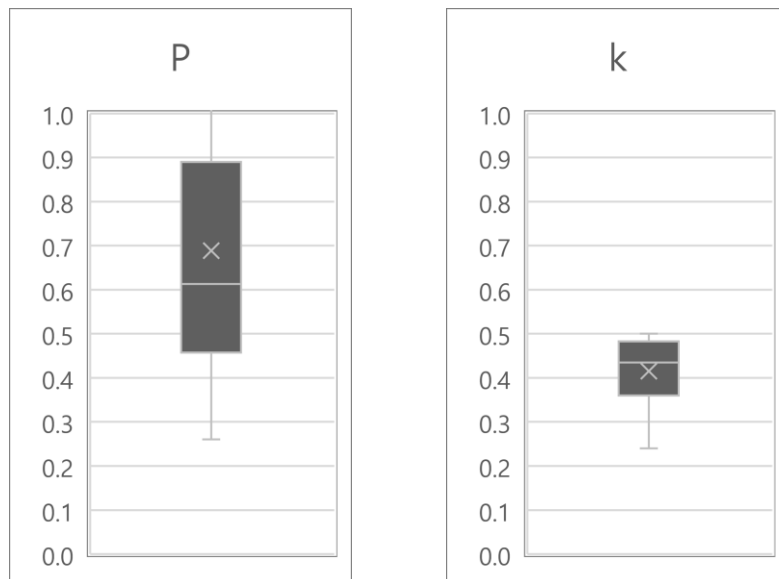


Table 3.3 Results of estimating system parameters η_v and η_f

	Operation mode		
	Step 1	Step 2	Step 3
η_v	0.60	0.60	0.70
[-]	($Q_v=107 \text{ m}^3/\text{h}$)	($Q_v=121 \text{ m}^3/\text{h}$)	($Q_v=145 \text{ m}^3/\text{h}$)
η_f	0.89	0.80	0.97
[-]	($Q_f=125 \text{ m}^3/\text{h}$)	($Q_f=245 \text{ m}^3/\text{h}$)	($Q_f=305 \text{ m}^3/\text{h}$)

3.3.2 실내 미세먼지 농도 해석부의 검증

3.3.2.1 검증 실험의 방법 및 조건

Ventilation 시스템 또는 Filtration 시스템을 가동시키고 실내외 미세먼지 농도 및 실내 환기율을 동시에 측정하여 실내 미세먼지 농도 해석부를 검증하였다. 측정에 사용된 장비와 측정 간격은 3.3.1절의 P , k 계수 획득 실험과 동일하다. 실험에 앞서, 실내에서 미세먼지를 발생시켜 실내 농도를 증가시킨 후, 발생원을 제거하였다. 이는 고농도의 실내 미세먼지가 Ventilation 또는 Filtration 시스템 운전에 의해 저감되는 정도를 용이하게 산출하기 위함이다. 발생원의 종류 및 발생 시간은 P , k 계수 획득 실험과 동일하게 진행되었다. 발생원 제거 후, 실내 미세먼지 농도가 감소하기 시작하는 시점에 Ventilation 시스템 또는 Filtration 시스템을 작동시키고 실내 농도 변화를 측정하였다. 동일한 실험이 시스템 풍량별로 진행되었다.

3.3.2.2 예측 결과와 측정 결과의 비교 분석

해석 모델을 검증하기 위해 필요한 계수(P , k , η_v , η_f) 및 Filtration 시스템의 실제 풍량(Q_f)은 앞서 3.3.1. 절에서 측정한 값을 활용하였다. 침기율(λ)은 해당 검증 실험 동안 측정된 값의 평균을 사용하였다. Ventilation 시스템의 실제 풍량(Q_v)은 Tracer gas 장비로 측정된 공기교환율에서 침기율을 $0.06\ h^{-1}$ 로 가정하여 풍량을 계산한 값을 활용하였다 (Table 3.4). 침기율 가정 값인 $0.06\ h^{-1}$ 은 측정기간(20일간) 동안의 침기율 빈도분포 분석을 통해 구한 최빈값(Fig. 3.8 참조)에 해당한다.

Ventilation 시스템과 Filtration 시스템 풍량별로 미세먼지 농도 측정 결과와 해석 모델 예측 결과를 비교한 결과는 Fig 3.9 ~ Fig 3.14과 같다. 예측 결과와 측정된 결과가 비교적 정확하게 일치하는 것으로 나타나 해석 모델이 실제를 잘 모사하고 있으며, 따라서, 미세먼지 농도 해석부의 타당성을 확인할 수 있었다.

본 절에서 검증을 실시한 미세먼지 농도 해석부는 실내 발생원이 없는 조건(No indoor source)에서 실시되었다. 검증된 No indoor source 미세먼지 농도 해석부를 바탕으로 다음 절의 실내 미세먼지 발생 해석부의 검증을 진행하였다.

Table 3.4 Input values of simulation model obtained by measurements

No.	P [-]	k [-]	λ [h ⁻¹]	V [m ³]	Q_v [m ³ /h]	η_v [-]	Q_f [m ³ /h]	η_f [-]
V_Step 1	0.7	0.4	0.06	132	47	0.60	-	-
V_Step 2			0.06		55	0.60	-	-
V_Step 3			0.06		64	0.70	-	-
F_Step 1			0.08		-	-	125	0.89
F_Step 2			0.11		-	-	245	0.80
F_Step 3			0.09		-	-	305	0.97

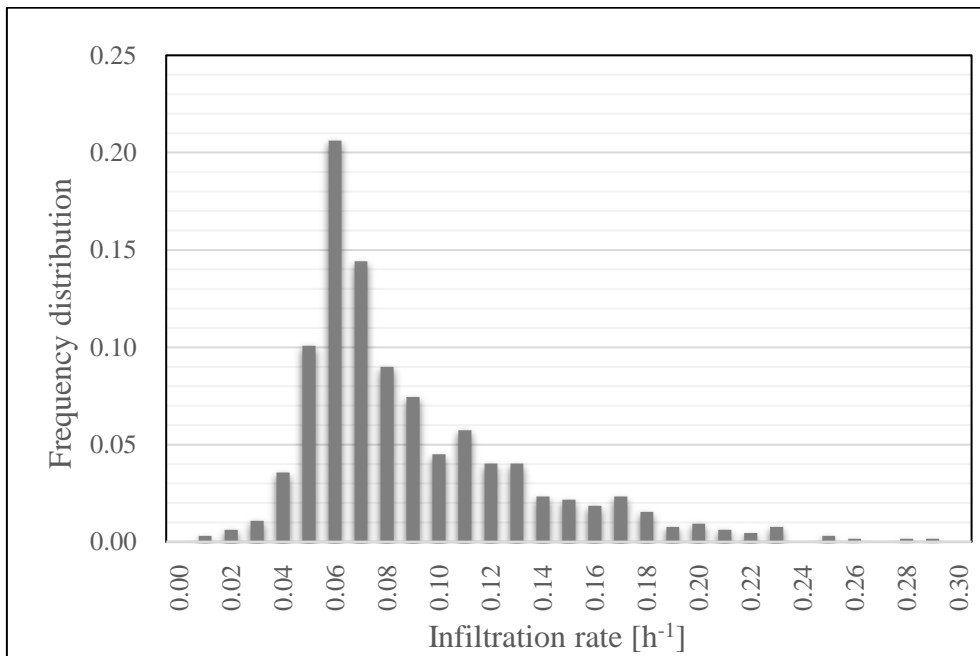


Fig. 3.8 Frequency distribution of infiltration rate during test periods

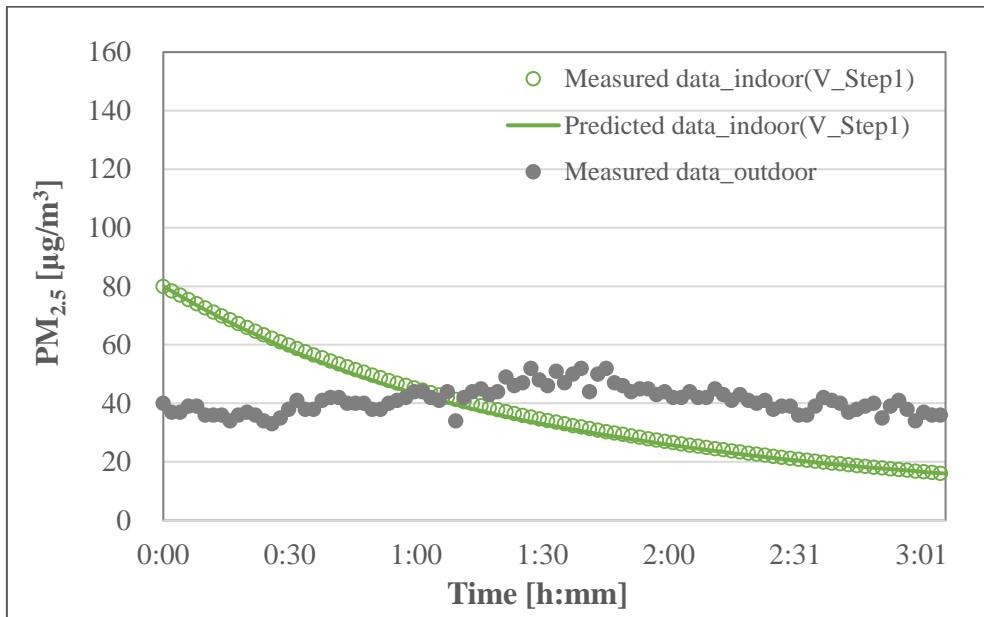


Fig. 3.9 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 1 of ventilation system

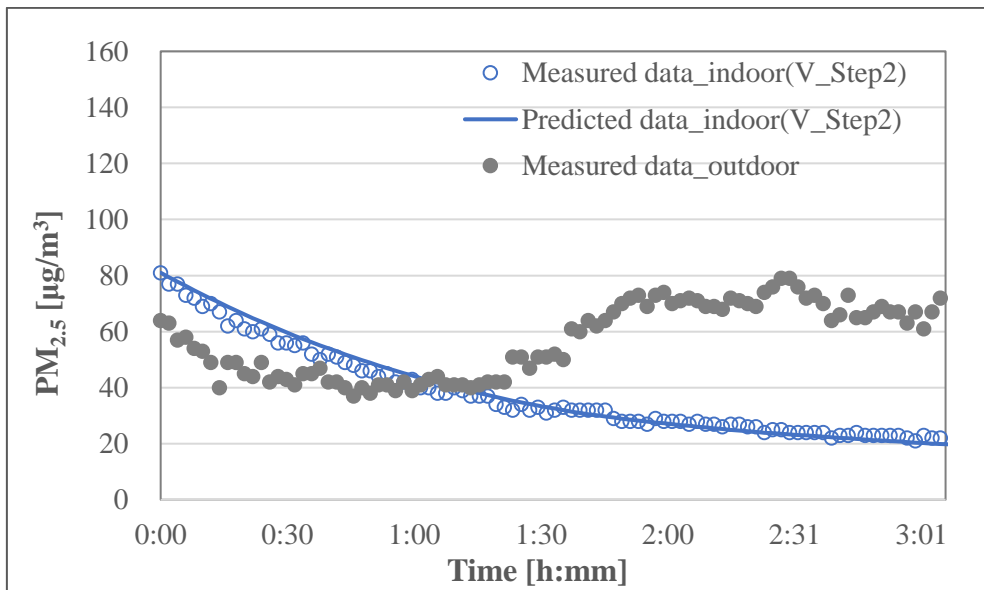


Fig. 3.10 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 2 of ventilation system

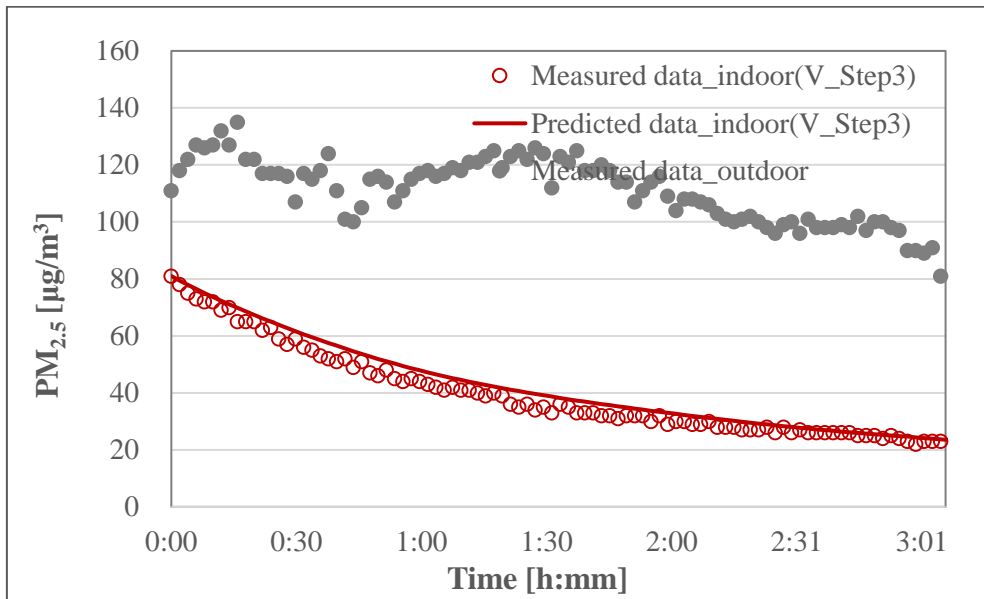


Fig. 3.11 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 3 of ventilation system

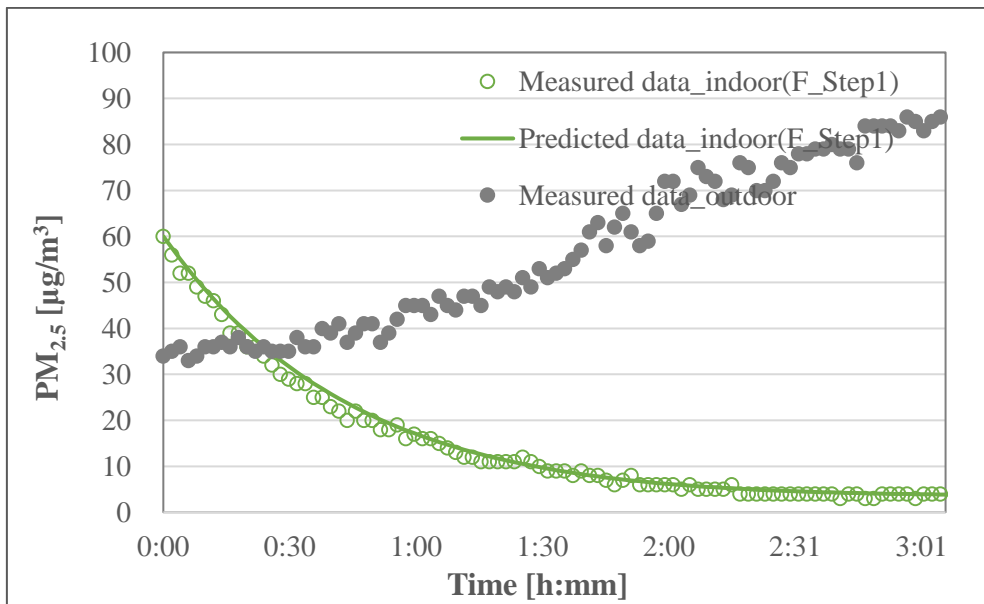


Fig. 3.12 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 1 of filtration system

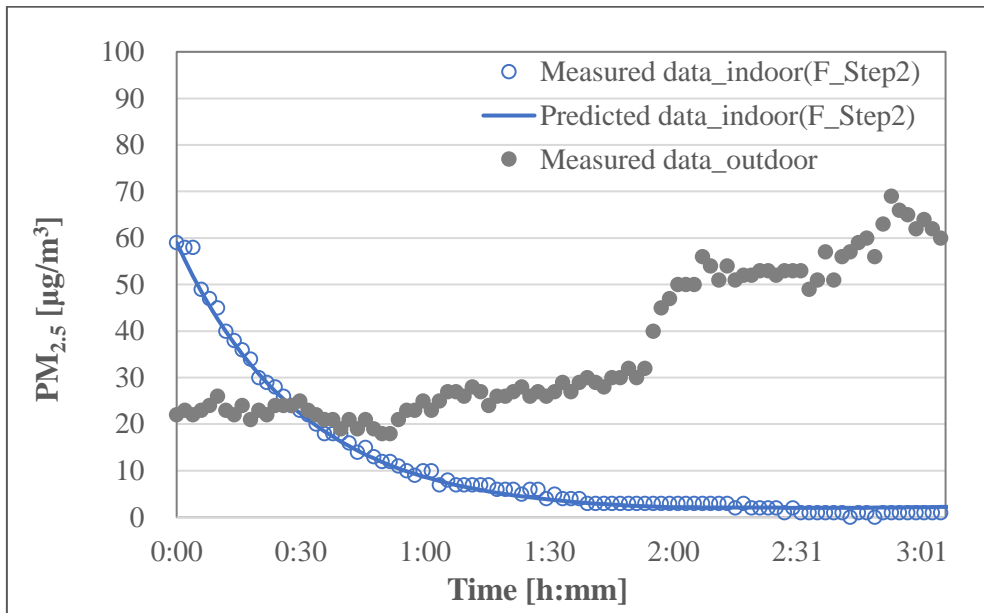


Fig. 3.13 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 2 of filtration system

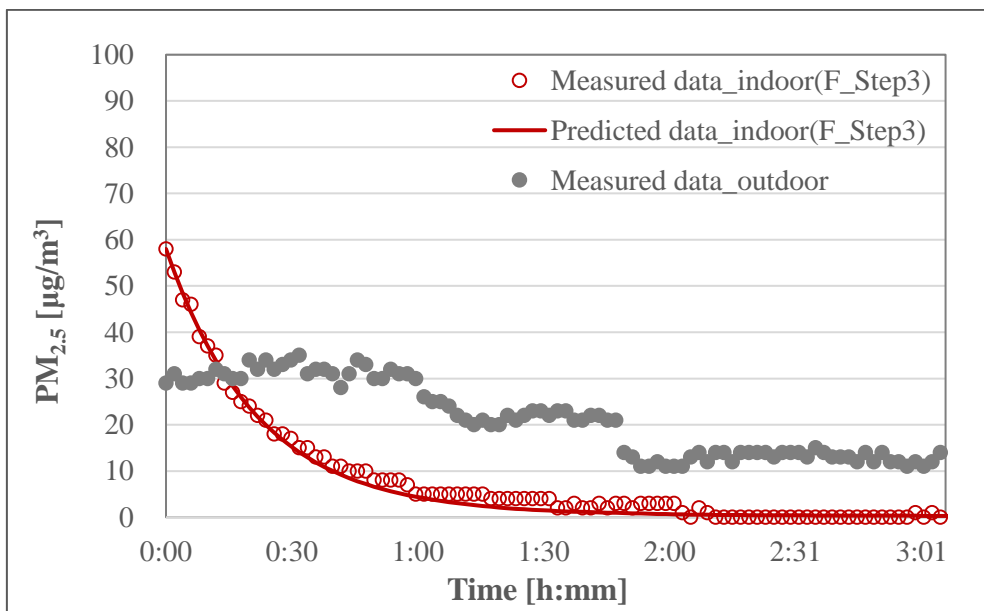


Fig. 3.14 Comparison between measured data and predicted data during operation mode step 3 of filtration system

3.3.3 실내 미세먼지 발생 예측 해석부의 검증

현재의 측정기술로 미세먼지 발생량을 직접 측정하는 것은 어려우므로 발생량 해석모델의 예측값을 실험 값과 직접적으로 비교하기는 불가능하다. 따라서 실내 미세먼지 발생 해석부의 검증은 동일한 실내 발생원을 동일한 조건으로 발생시키는 실험을 수회 반복한 후, 실험 데이터를 바탕으로 발생량을 예측한 값들 간의 유사성으로 판단하였다.

실내 미세먼지 발생량 해석부 검증을 위해서 3.3.2의 미세먼지 농도 해석부 검증 실험 전에 실내 미세먼지 농도를 높이기 위한 목적으로 진행된 10분간 양초 연소 및 재부유 실시 구간의 데이터가 사용되었다. Fig 3.15는 양초 연소시 실내 공기 중의 미세먼지 개수 농도의 입경별 분포이다. 입경별 분포로부터 양초에 의한 연소는 $PM_{2.5}$ 에 해당하는 Fine particle 입경의 미세먼지를 주로 발생시키는 발생원인 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 Fig 2.7에서 정리한 실내 발생원에서 발생하는 입경 범위의 고찰 결과와도 일치한다.

식 (3.14)에서 실내 미세먼지 발생을 추정을 위해 필요한 실내외 미세먼지 농도(C_{out} , C_{in}), 침기율(λ)은 직접 측정하였고, 계수(P , k)는 3.3.1절에서 획득한 계수 값을 활용하였다. 4회에 걸쳐 진행된 실험 결과를 바탕으로 실내 미세먼지 발생을 예측식에 의해 계산된 값은 Table 3.5에서 보는 것과 같이 953~1,066 $\mu\text{g}/\text{min}$ 로 비교적 서로 유사한 값을 나타내는 것으로 확인되었다.

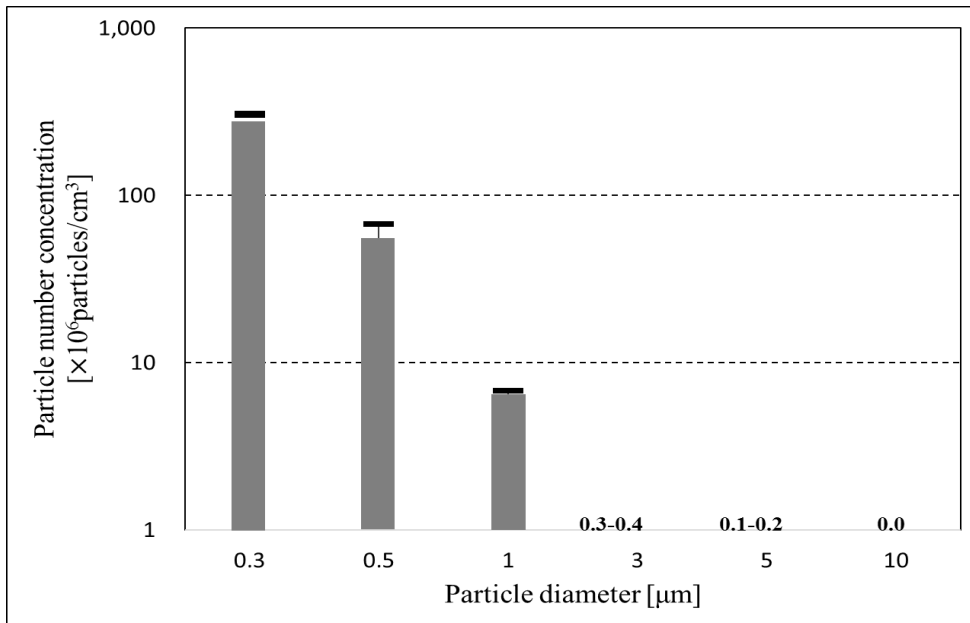


Fig. 3.15 Diameter range of particles generated from burning candle

Table 3.5 Results of indoor source generation rate

	No.1	No.2	No.3	No.4
G [$\mu\text{g}/\text{min}$]	1,007	1,066	1,049	953

<div style="text-align: center;"> <p>G</p> </div>	
--	--

3.4 소결

본 장에서는 실외 미세먼지 침투 및 실내 미세먼지 발생이 일어나는 공간에서 Ventilation과 Filtration 시스템의 실내 미세먼지 농도에 대한 영향을 분석하기 위해 실내 미세먼지 농도 및 발생 해석모델을 구축하였다. 해석모델의 검증을 위하여 현장실험을 실시하였으며 검증 실험에 앞서 모델에 필요한 계수의 실질 값을 획득하기 위해 계수 획득 실험을 진행하였다. 미세먼지 농도 해석모델은 실제 공간에서의 미세먼지 농도 측정값과 모델을 이용하여 예측된 농도값을 비교하여 일치성을 확인함으로써 검증을 실시하였다. 미세먼지 발생 예측모델은 동일한 발생 실험을 수회 반복하면서 측정한 농도값을 바탕으로 발생율을 예측하고, 예측된 발생율 값들 간의 비교를 통해 검증을 실시하였다. 검증 결과, 실제 공간에서의 측정값과 예측값이 잘 일치(오차의 평균 5%, 오차의 최대값 17%)하는 것으로 나타나 해석모델의 타당성을 확인하였다.

제 4 장

주요 영향인자 변화에 따른 실내 미세먼지 농도특성

- 4.1 주요 영향인자 선정 및 평가범위 결정
 - 4.2 주요 영향인자 변화에 따른 실내 농도특성
 - 4.3 소 결
-

Ventilation과 Filtration에 의한 실내 미세먼지 농도 제어 효과를 파악하기 위해서는 다양한 영향인자의 변화에 따른 실내농도 특성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 따라서 본 장에서는 다양한 환경조건 및 제어조건에 따른 실내 미세먼지 농도 특성을 평가하고자 하며, 이를 위해 우선 영향인자를 환경관련 인자와 제어관련 인자로 분류하고, 환경관련 인자 중 영향도 분석을 통해 영향도가 큰 인자를 제어관련 인자와 함께 주요 영향인자로 선정하였다. 다음으로 기존 연구를 참고하여 선정된 인자의 평가 범위를 결정하고 그에 따른 실내 미세먼지 농도 특성을 평가하였다. 마지막으로 환경조건 영향인자와 Ventilation과 Filtration 제어관련 영향인자 변화에 따라 달라지는 실내 미세먼지 농도 경향을 비교하여 각 인자가 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

4.1 주요 영향인자 선정 및 평가범위 결정

앞서 2.1.3절에서 실내 미세먼지 농도에 영향을 주는 인자로 실외 미세먼지 농도, 침투계수, 침기율, 침착계수, 실내 미세먼지 발생율, Ventilation airflow rate, Filtration airflow rate, 환기시스템과 공기청정시스템의 미세먼지 제거효율 등이 있음을 고찰하였다. 이러한 영향인자는 환경적으로 주어지는 인자와 실내 미세먼지 농도를 줄이기 위해 제어되는 인자로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 전자를 환경조건 영향인자(Environmental parameter), 후자를 제어관련 영향인자(Control related parameter)로 구분하였다(Fig. 4.1 참조).

4.1.1 주요 영향인자의 선정

다양한 영향인자들의 변화에 따른 실내 미세먼지 농도 변화 특성에 대한 평가가 수행되는 것이 바람직하겠으나, 환경조건 영향인자 중에는 본 논문에서 고찰하고자 하는 연구범위에서는 변화의 범위가 작아 최종적으로 미치는 영향이 미미한 인자일 가능성이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 영향인자에 대해 실내 미세먼지 농도 변화 정도에 미치는 영향 정도를 기준으로 평가하여 유의미한 영향도를 갖는 인자를 주요 영향인자로 선별하였다.

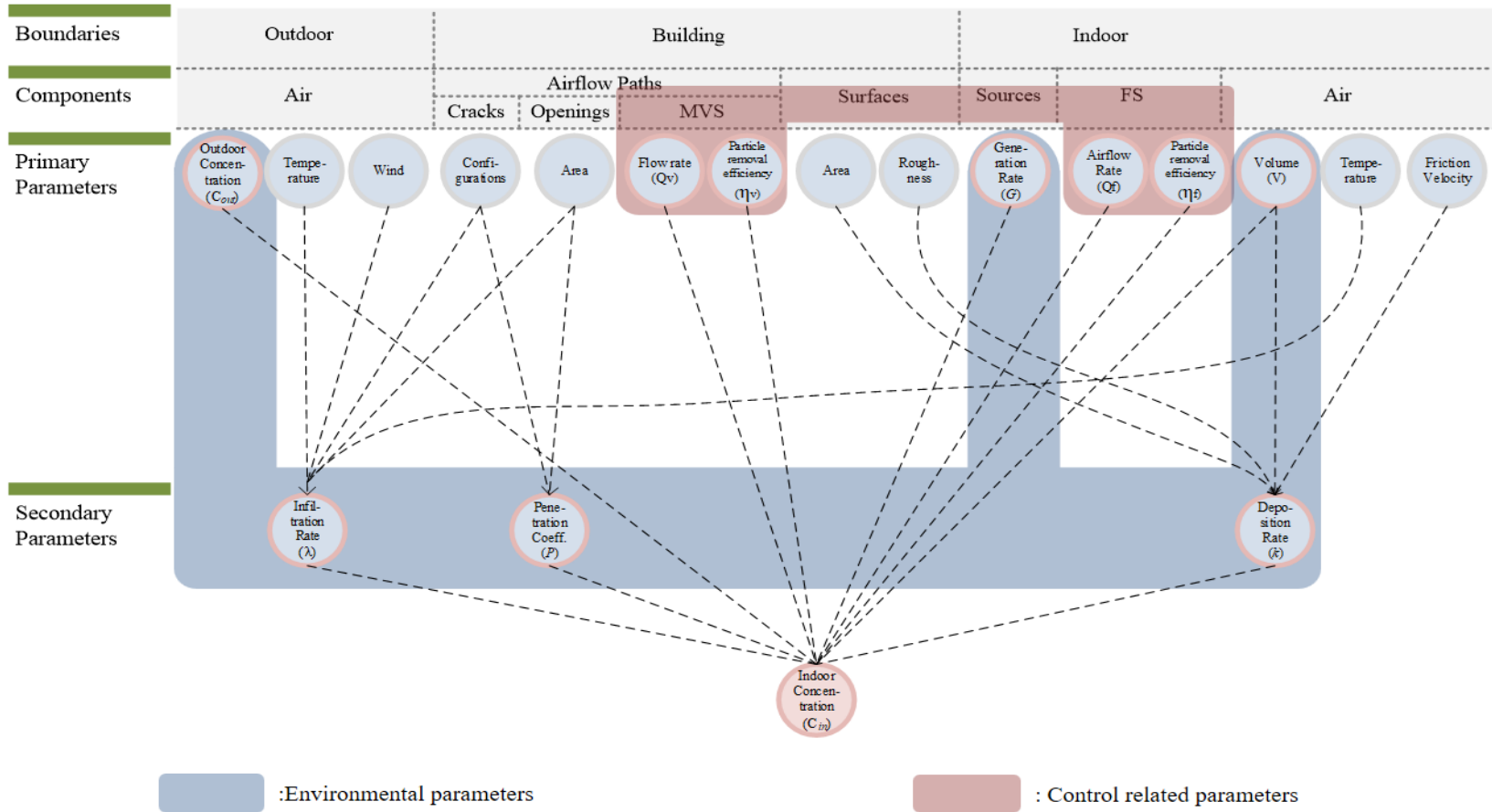


Fig. 4.1 Categorization of parameters related to indoor particle concentration

Table 4.1 Level of factors predicted to influence on indoor particle concentration

Label	Factor	Low	High
A	Outdoor particle concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10	90
B	Penetration coefficient	0.6	0.8
C	Infiltration rate, h^{-1}	0.1	0.5
D	Indoor generation rate, $\mu\text{g}/\text{min}$	400	2,000
E	Deposition rate, h^{-1}	0.35	0.45

본 연구에서는 2^k factorial DOE (design of experiments)⁷³를 활용하여 인자의 영향도를 분석하였다. 2^k factorial DOE는 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 요인(factor)이 다양한 경우, 그 요인들의 영향도를 분석하여 영향이 작은 인자들을 제외하고자 할 때 유용한 방법이다.

환경조건 영향인자에 Table 4.1과 같이 두 가지 수준의 값을 할당하였다. 각 요인들의 두 수준 값은 기존 연구문헌 및 자료들을 고찰하여 실제 $\text{PM}_{2.5}$ 에 해당하는 실외 농도, 침투계수, 실내 발생율, 침착계수의 수준을 범위로 설정하였다. 영향 정도를 파악하는 반응 지표(response)는 실내 미세먼지 농도로 설정하였다. 어떤 인자가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향이 크다는 의미는 2^k factorial DOE 분석에서 요인의 두 수준 간 반응 지표의 차이가 커진다는 것이다.

A부터 E의 5개의 인자가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해 필요한 시뮬레이션의 수는 $32(=2^5)$ 개이다. 각 케이스의 조건을 입력하여 시뮬레이션을 수행한 영향도 분석 결과는 Fig. 4.2와 Fig. 4.3과 같다. 그래프 결과 환경조건 영향인자 중 실내 미세먼지 발생율에 의한

73 Douglas C M. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons. 2013;233–292.

영향이 가장 크고, 실외 미세먼지 농도 역시 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향이 유의미한 것으로 나타났다. 그 외 관련 인자들이 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이는 국내 공동주택의 $PM_{2.5}$ 를 대상으로 한 것으로 건물 특성이 다르거나 입경이 다른 미세먼지와 비교했을 때의 영향도 분석과 차이가 있을 수 있음을 밝힌다.

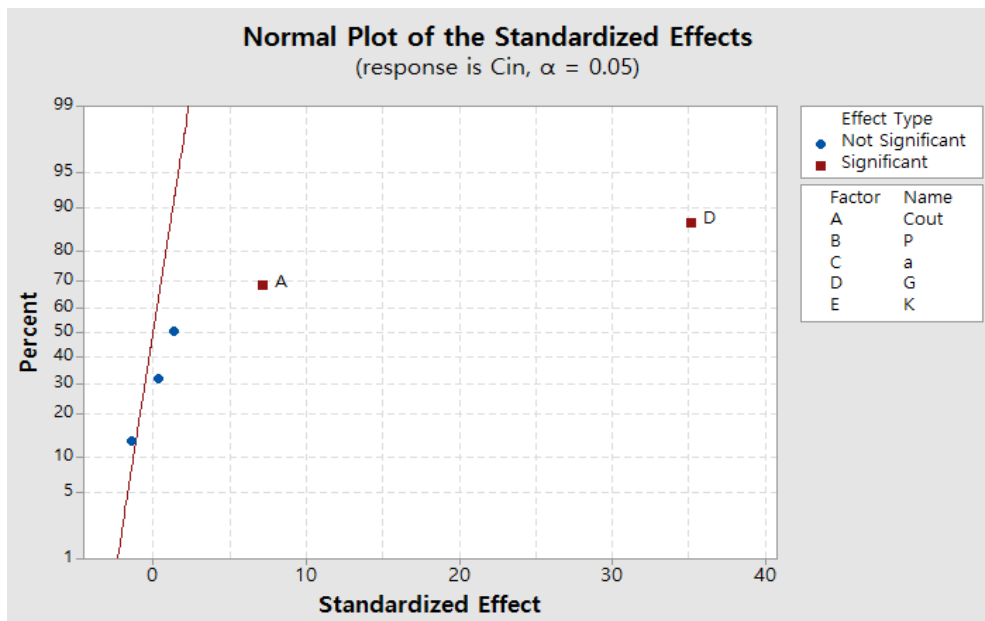


Fig. 4.2 Normal plot of the effects on response variable

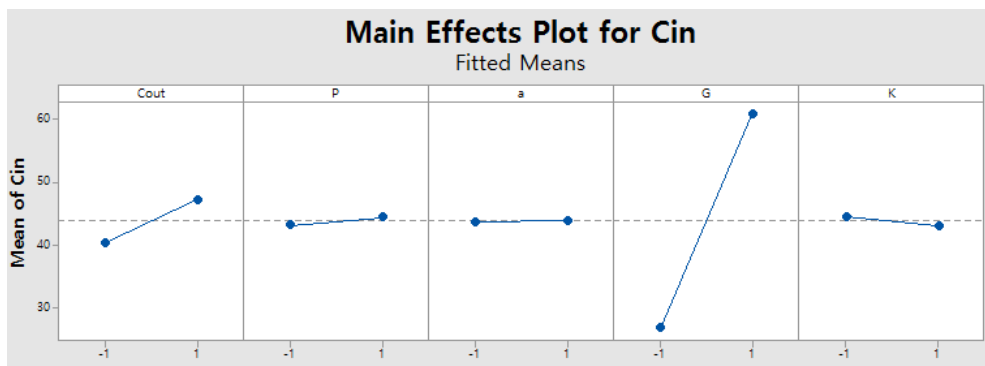


Fig. 4.3 Main effects plot for indoor concentration

앞서의 영향도 분석결과를 바탕으로 환경조건 영향인자 중 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생율을 주요 인자로 선정하였으며, 제어관련 영향인자는 본 연구의 목적에 따라 모두 주요 인자로 결정하였다 (Table 4.2 참조).

Table 4.2 Selected influence parameters on indoor particle concentration

	Category	Influence	Dynamic range	Selected
Environmental parameters	Outdoor particle concentration	●	●	√
	Penetration coefficient	●	○	
	Infiltration rate	●	○	
	Deposition rate	●	○	
	Generation rate	●	●	√
	Room volume	●	×	
Control related parameters	Ventilation airflow rate	●	●	√
	Filtration airflow rate	●	●	√
	Filter efficiency (Ventilation system)	●	○	√
	Filter efficiency (Filtration system)	●	○	√

* ●: High potential ○: Least potential ×: No potential

4.1.2 주요 영향인자의 평가범위

본 절에서는 시뮬레이션을 위한 주요 영향인자의 범위를 설정하여 시뮬레이션 케이스 선정에 활용할 수 있도록 하였다. 우선 환경조건 영향인자 중 실외 미세먼지 농도의 범위 설정을 위하여 한국환경공단에서 실시간으로 대기오염도를 측정하여 공개하는 에어코리아⁷⁴의 데이터를 참고하였다. 공개된 데이터에 의하면 2015년 1월부터 2017년 6월까지 30개월간 서울 측정소의 평균 $PM_{2.5}$ 농도 중 최저농도는 $2\mu g/m^3$ (2016년 10월 24일 광진구 측정소), 최고농도는 $97\mu g/m^3$ (2017년 1월 3일 용산구 측정소)로 나타났다. 이를 바탕으로 실외 미세먼지 농도의 평가범위는 $0\sim 100\mu g/m^3$ 로 설정하였다.

실내 미세먼지 농도 발생율의 범위는 기존 연구문헌의 데이터를 참고하여 설정하였다. 기존 연구문헌에 의하면 청소활동에 의해 발생하는 $PM_{2.5}$ 의 발생률은 $18\sim 200\mu g/min$ ^{75,76,77}, 거주자 움직임에 의해 발생하는 $PM_{2.5}$ 의 발생률은 $18\sim 100\mu g/min$ ^{75,76}, 담배 연소에 의해 발생하는 $PM_{2.5}$ 의 발생률은 $990\sim 1,700\mu g/min$ ^{75,77,78,79} 조리 활동에 의한 발생하는 $PM_{2.5}$ 의 발

74 한국환경공단. Airkorea. www.airkorea.or.kr (accessed 11 September 2017).

75 Ferro AR, Kopperud RJ, Hildemann LM. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. *Environmental Science & Technology*. 2004;38:1759-1764.

76 Wallace LA. Indoor particles: A review. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 1996;46:98-126.

77 He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*. 2004;38:3405-3415.

78 Kleipis N, Ott W, Switzer P. A multiple smoker model for predicting indoor air quality in public lounges, *Environmental Science & Technology*. 1996;30:2813-2820.

79 Brauer M, Hirtle R, Lang B, Ott W. Assessment of indoor fine aerosol contributions from

생물은 110~2,780 $\mu\text{g}/\text{min}$ ^{75, 76}의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 실내 미세먼지 발생율의 평가범위는 0~3,000 $\mu\text{g}/\text{min}$ 로 설정하였다.

제어관련 영향인자 중 Ventilation airflow rate의 범위는 84 m^2 면적의 2.3m의 층고를 갖는 공동주택의 최소 환기율 기준(0.5h^{-1})을 만족시키는 100 m^3/h 의 풍량과 해당 면적의 공동주택에 일반적으로 설치되는 환기시스템의 최대 풍량인 200 m^3/h 를 평가범위로 선정하였다. 그리고 400 m^3/h (2h^{-1})와 600 m^3/h (3h^{-1}) 풍량을 평가범위에 추가하였다. Filtration airflow rate의 평가범위는 Ventilation airflow rate의 범위와 동일하게 설정하였다.

Filter efficiency는 PM_{2.5} 기준으로 제거율 35%, 65%, 95% 성능을 갖는 필터를 대상으로 평가하였다. 이를 ASHRAE의 MERV(Minimum Efficiency Reporting Value) rating 기준⁸⁰과 비교하면 제거율 35%는 MERV 7, 65%는 MERV 11, 95%는 MERV 16에 각각 해당한다. MERV 7은 Better residential에 적용되는 필터성능, MERV 11은 Superior residential에 적용되는 필터성능에 해당하며, MERV 16은 병원에 적용되는 HEPA 필터급에 해당한다. 이상의 선정된 영향인자의 평가범위를 Table 4.3에 정리하였다.

environmental tobacco smoke and cooking with a portable nephelometer. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. 2000;10:136-144.

80 ANSI/ASHRAE Standard: 52.2-2007. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size. American Society of Heating Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers. 2007.

Table 4.3 Ranges of selected parameters

Parameters	Range
Outdoor particle concentration [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
Generation rate [$\mu\text{g}/\text{min}$]	
Ventilation airflow rate [m^3/h]	
Filtration airflow rate [m^3/h]	
Filter efficiency [-]	

4.2 주요 영향인자 변화에 따른 실내 농도특성

4.2.1 환경조건 영향인자의 변화에 따른 특성

4.1절에서 각 환경조건 영향인자가 실내 미세먼지 농도 변화 정도에 미치는 영향도를 분석하여 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생을 주요 영향인자로 선정하였다. 본 절에서는 시뮬레이션을 통해 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생을 변화에 따른 실내 미세먼지 농도 특성을 파악하였다.

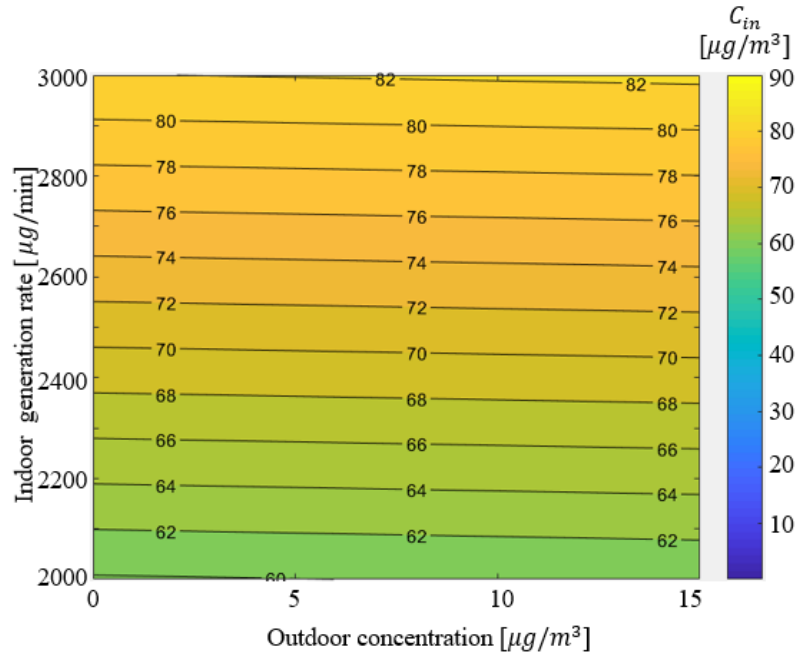
실내 미세먼지 농도 특성 평가는 공동주택의 대표 면적인 84 m^2 에 2.3m의 층고를 갖는 공간을 대상공간으로 하였다. 분석하고자 하는 인자의 다른 환경조건 영향인자에 대해서는 동일한 조건을 유지하였으며, 시뮬레이션 케이스는 Table 4.4와 같다.

Table 4.4 Simulation cases for analyzing the influence of environmental parameters

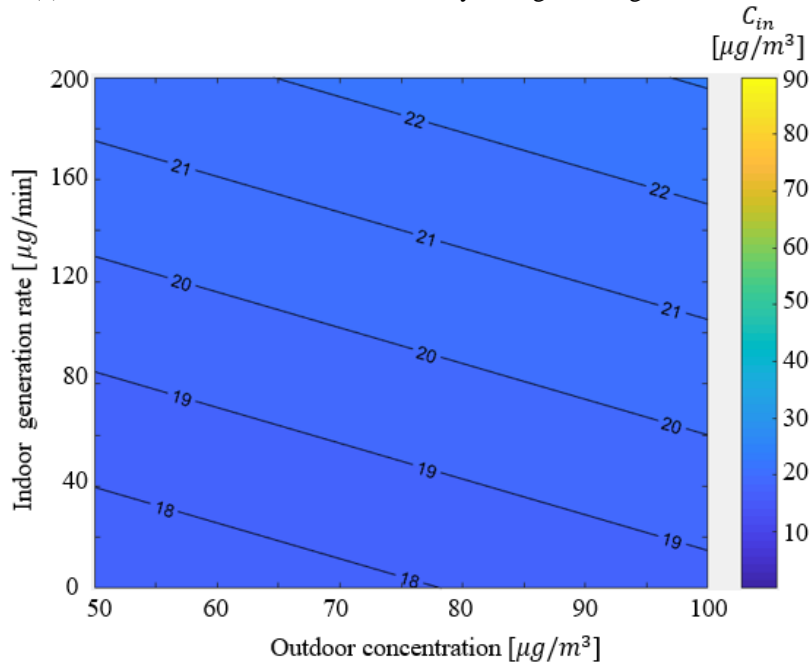
Parameters		Simulation case	Description
Environmental parameters	C_{out} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Every 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ from 0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$C_{out} \times G$ (matrix)
	G [$\mu\text{g}/\text{min}$]	Every 50 $\mu\text{g}/\text{min}$ from 0 to 3,000 $\mu\text{g}/\text{min}$	
	P [-]	0.7	
	k [h^{-1}]	0.4	
	λ [h^{-1}]	0.1	
	V [m^3]	200	

Fig. 4.4는 실외 미세먼지 농도(x축)와 실내 미세먼지 발생율(y축)에 따른 실내 미세먼지 농도(색)를 나타낸 3차원 그래프이다. 그래프에서 등농도선의 기울기가 완만할수록 실내 미세먼지 농도에 대하여 실내 미세먼지 발생의 영향이 크다는 것이고, 기울기가 급해질수록 실외 미세먼지 침투의 영향이 크다는 것을 의미한다.

Fig. 4.4의 (a), (b) 그래프의 기울기를 비교하면, (a)의 경우 그래프의 기울기가 거의 수평에 가까울 정도로 완만하고 (b)의 경우 상대적으로 그래프의 기울기가 큰 것을 확인할 수 있다. 그래프 (a)의 기울기가 수평에 가깝다는 것은 해당 환경조건 범위에서 실내 미세먼지 농도는 실내 발생에 의해 결정된다는 것을 의미한다. 해당 환경조건은 실외 미세먼지 농도의 범위가 $0\sim15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (good)이고, 실내 미세먼지 발생율의 범위는 $2,000\sim3,000\mu\text{g}/\text{min}$ (very strong)로 실외 미세먼지 침투 영향은 작고, 실내 미세먼지 발생 영향은 큰 조건이다. 그래프 (b)는 실외 미세먼지 농도의 범위가 $50\sim100\mu\text{g}/\text{m}^3$ (bad)이고, 실내 미세먼지 발생율의 범위는 $0\sim200\mu\text{g}/\text{min}$ (weak)조건의 시뮬레이션 결과이다. 그래프의 기울기를 보면, 해당 환경조건에서는 실외 침투와 실내 발생 모두 실내 미세먼지 농도 결정에 영향을 주는 것으로 나타난다. 즉, 실외 미세먼지 농도가 높은 조건에서도 거주자의 움직임 등에 의한 작은 실내 미세먼지 발생율이 여전히 실내 농도에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 기밀성능이 높은 국내 공동주택의 특성상 실외 미세먼지가 실내에 침투되는 양이 상대적으로 적기 때문이라 할 수 있다.



(a) Good outdoor concentration and Very strong indoor generation rate



(b) Bad outdoor concentration and Weak indoor generation rate

Fig. 4.4 Influence of C_{out} , G on indoor particle concentrations

4.2.2 Ventilation 제어관련 영향인자의 변화에 따른 특성

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제어관련 인자에 해당하는 Ventilation 시스템의 풍량(Q_v)과 필터 효율(η_v)을 변화 시켰을 때의 실내 미세먼지 농도 특성을 살펴보았다. 시스템의 풍량과 필터 효율의 조합으로 구성한 시뮬레이션 케이스(gray boxes)는 Table 4.5와 같다.

Table 4.5 Simulation cases for analyzing the influence of ventilation control related parameters

Case index	Control related parameters						
	Q_v [m^3/h]				η_v [-]		
	100	200	400	600	0.35	0.65	0.95
V100_0.35	Gray				Gray		
V100_0.65	Gray					Gray	
V100_0.95	Gray						Gray
V200_0.35		Gray			Gray		
V200_0.65		Gray				Gray	
V200_0.95		Gray					Gray
V400_0.35			Gray		Gray		
V400_0.65			Gray			Gray	
V400_0.95			Gray				Gray
V600_0.35				Gray	Gray		
V600_0.65				Gray		Gray	
V600_0.95				Gray			Gray

Ventilation 제어관련 영향인자가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 Fig. 4.5와 같은 3차원 그래프를 통해 비교 분석하였다. Fig. 4.5는 x축과 y축의 값으로 조합할 수 있는 모든 환경조건에 대하여 환기풍량 $400\text{m}^3/\text{h}$, 필터효율 0.65의 Ventilation 제어를 30분간 적용하였을 때, 실내 미세먼지 농도를 색과 등농도선으로 표현한 것이다. 예를 들어, 점 A의 경우, 실외 미세먼지 농도가 $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 실내 미세먼지 발생율이 $950\mu\text{g}/\text{min}$ 인 환경조건에서 환기풍량 $400\text{m}^3/\text{h}$, 필터효율 0.65의 Ventilation 제어를 30분간 적용하였을 때의 실내 미세먼지 농도(약 $28\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타낸다. 이와 같은 3차원 그래프를 Ventilation 풍량과 필터효율에 따라 비교한 결과는 Table 4.6과 같다.

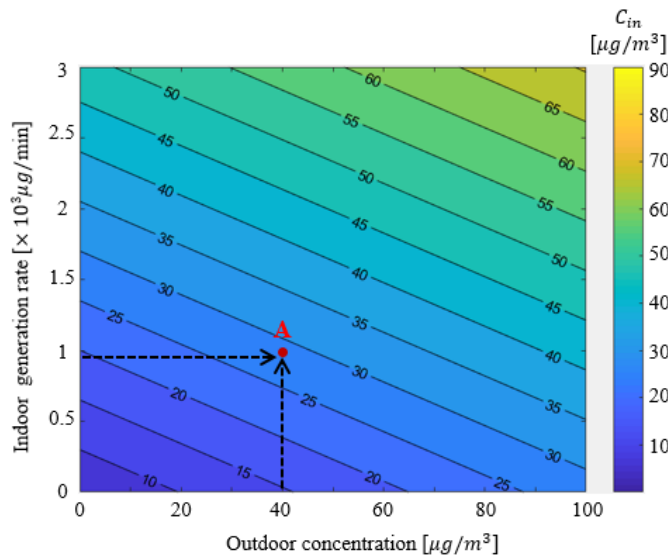


Fig. 4.5 Indoor particle concentrations under ventilation control with $Q_v=400\text{m}^3/\text{h}$ and $\eta_v=0.65$

Table 4.6 Influence of Q_v , η_v on indoor particle concentrations

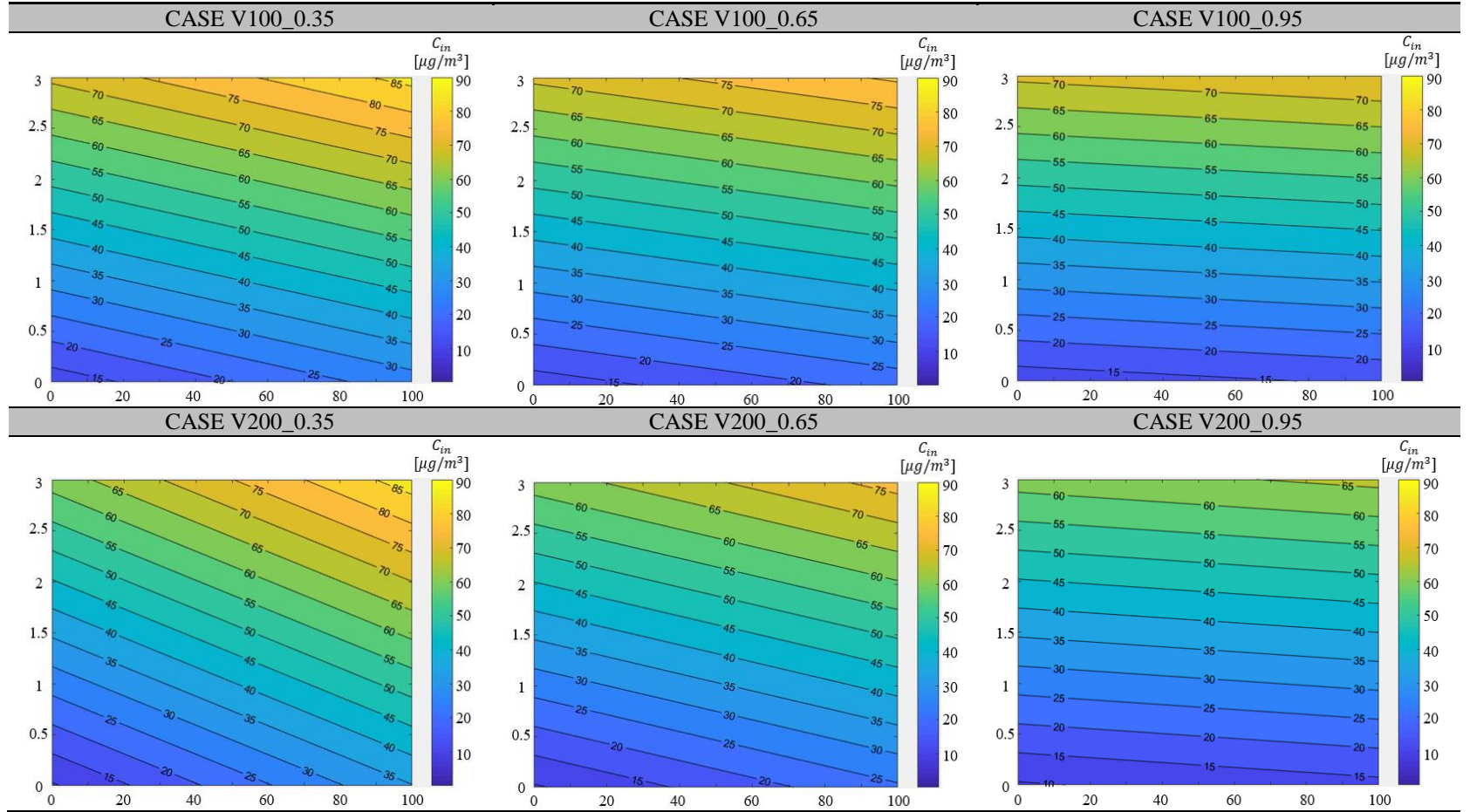


Table 4.6 Influence of Q_v , η_v on indoor particle concentrations (continued)

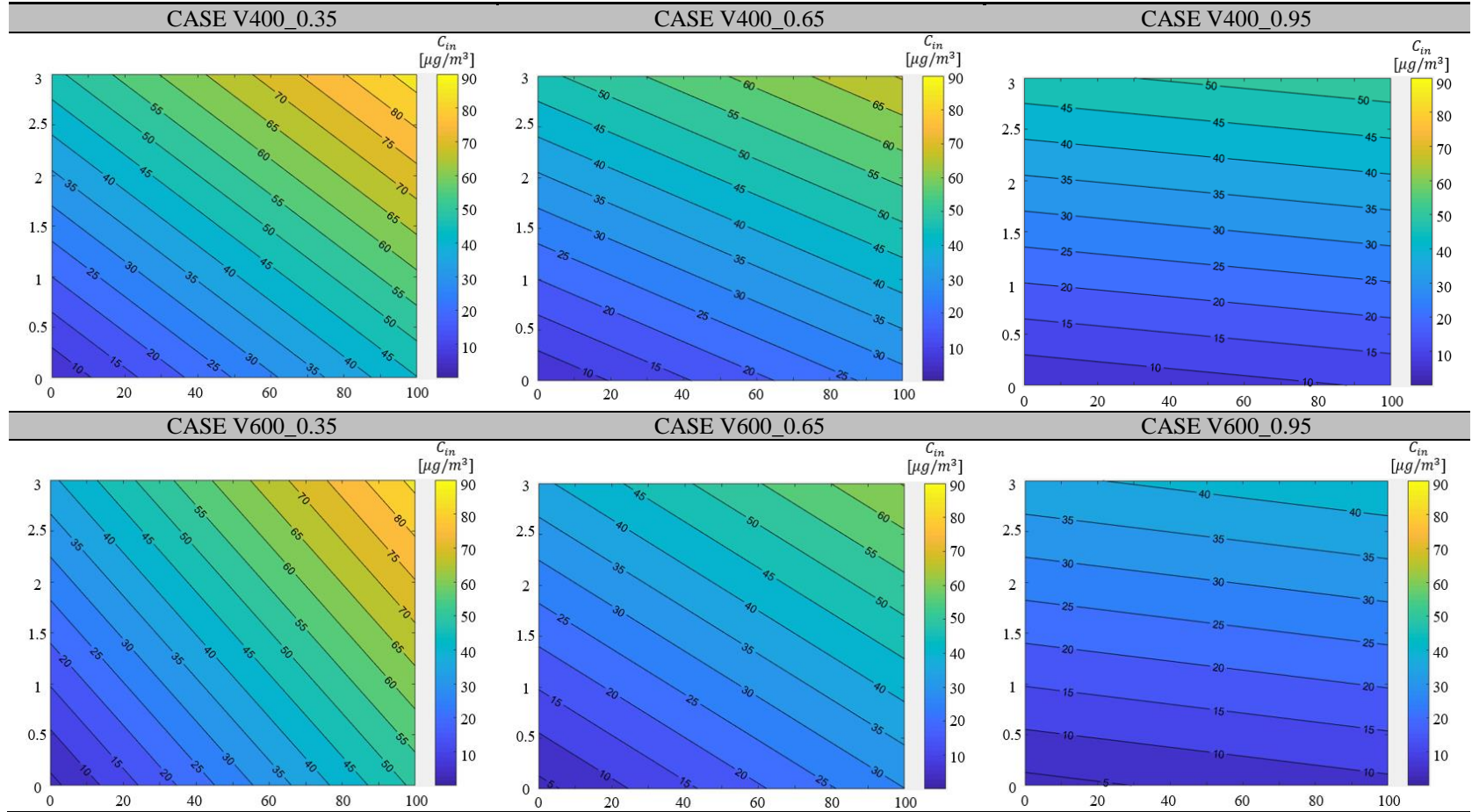
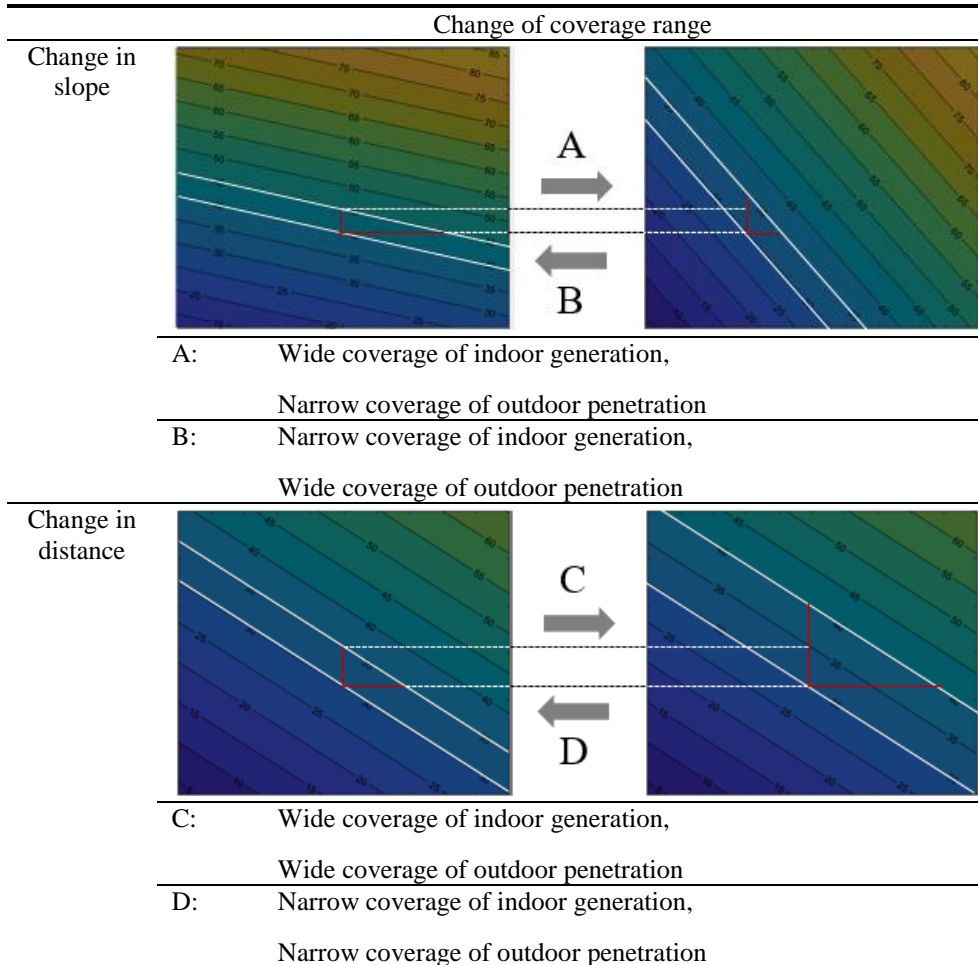


Table 4.7 Meaning of change in slope and distance of iso-indoor concentration lines



Ventilation 풍량과 필터효율 별로 실내 농도 그래프를 서로 비교해보면
 때 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 마다 표시한 등농도선의 기울기와 등농도선간의 간격이 다른
 을 확인할 수 있다. Table 4.7의 A와 같이 등농도선의 기울기가 커지는 제
 어 방법은 실내 발생 미세먼지 희석에는 유리하지만 동시에 실외 미세먼
 지 유입 가능성이 높아지기 때문에 실내 발생이 많고, 실외 침투가 낮은
 조건에서 유리한 제어방법이다. 반대로 B와 같이 등농도선의 기울기가

완만해지는 제어 방법은 실내 발생 미세먼지 희석에는 불리하지만 실외 미세먼지의 실내 침투를 줄이는데 유리하므로 실내 발생이 크지 않고, 실외 침투가 높은 조건에서 유리한 제어방법이다. C와 같이 그래프의 등농도선 간의 간격이 넓어지는 제어 방법의 경우, 실내 발생 미세먼지 희석에도 유리한 동시에 실외 미세먼지 유입 가능성도 줄일 수 있어 실내 발생도 많고 실외 침투가 높은 조건에서 필요한 제어방법이다. 반대로 D와 같이 간격이 좁아지는 제어 방법을 적용했을 경우, 실내 발생 미세먼지 희석에도 불리하고 실외 미세먼지의 실내 침투 가능성도 커지기 때문에 더 낮은 에너지 비용으로 실내 목표 농도 유지가 가능할 경우에만 적용되어야 한다.

4.2.2.1 필터효율의 영향

Ventilation 제어인자 중 필터효율이 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, Ventilation 풍량은 동일하고 필터효율이 0.35, 0.65, 0.95로 성능이 커지는 경우에 실외 농도와 실내 발생률 조건에 따른 실내 농도 그래프를 비교 분석하였다.

풍량이 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 인 경우(Table 4.6 첫번째 행)에는 필터효율이 변화함에 따라 등농도선의 기울기 변화가 크지 않고, 간격의 차이도 크지 않다. 이는 환기 시스템을 최소풍량으로 운전할 경우에는 필터효율 성능 변화에 따른 실내 미세먼지 농도의 차이가 크지 않음을 의미한다. 다시 말해, 최소풍량일 경우, 고효율필터 적용효과가 크지 않는다는 것을 의미한다.

풍량이 가장 큰 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 인 경우(Table 4.6의 네번째 행), 필터효율이

0.35, 0.65, 0.95로 높아짐에 따라 등농도선의 기울기가 완만해지고, 간격도 넓어진다. 이는 풍량이 크면 필터효율 성능이 좋아짐에 따라 실외 미세먼지 침투 제어 및 실내 발생 희석 효과가 커 실내농도 개선효과가 크다는 것을 의미한다.

필터효율이 높아질수록 실외 미세먼지 침투를 줄이고, 희석 효과를 높이는데 도움이 되나 환기풍량이 적을 때는 실내로 유입되는 외기 도입량 자체가 작아 필터효율의 효과가 크지 않은 것으로 확인 되었다.

4.2.2.2 풍량의 영향

Ventilation 제어인자 중 풍량이 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해, 필터효율은 동일하고 풍량이 100, 200, 400, 600 m^3/h 로 성능이 커지는 경우의 실외 농도 및 실내 발생률에 따른 실내 농도 그래프를 비교 분석하였다.

필터의 효율이 0.35%인 경우(Table 4.6의 첫번째 열), 풍량이 커짐에 따라 등농도선의 기울기는 급격해지나 간격은 차이가 크지 않았다. 이는 저효율 필터가 적용되었을 경우, 풍량이 커짐에 따라 실내 미세먼지 발생 제어에는 유리하나 실외 미세먼지 침투 제어에 취약하다는 것을 의미한다. 다시 말해, 저효율 고풍량의 제어는 외기 농도가 낮을 때는 적용 가능한 방법이지만 외기 농도가 높을 때는 적용할 수 없다.

필터의 효율이 0.95%인 경우(Table 4.6의 세번째 열)에는 풍량이 커짐에 따라 등농도선의 기울기 변화가 크지 않고, 간격은 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 고효율 필터가 적용되었을 경우, 풍량이 커짐에 따라

실외 미세먼지 침투 제어 및 실내 발생 희석 효과가 커 실내농도 개선효과가 크다는 것을 의미한다.

4.2.3 Filtration 제어관련 영향인자의 변화에 따른 특성

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 제어관련 인자에 해당하는 Ventilation 시스템의 풍량(Q_v)과 필터 효율(η_v) 그리고 Filtration 시스템의 풍량(Q_f)과 필터 효율(η_f)을 변화 시켰을 때의 실내 미세먼지 농도 특성을 살펴보았다. 시스템의 풍량과 필터 효율의 조합으로 구성한 시뮬레이션 케이스(gray boxes)는 Table 4.8과 같다.

Table 4.8 Simulation cases for analyzing the influence of filtration control related parameters

Case index	Control related parameters						
	Q_f [m^3/h]				η_f [-]		
	100	200	400	600	0.35	0.65	0.95
F100_0.35							
F100_0.65							
F100_0.95							
F200_0.35							
F200_0.65							
F200_0.95							
F400_0.35							
F400_0.65							
F400_0.95							
F600_0.35							
F600_0.65							
F600_0.95							

Filtration 풍량과 필터효율에 따라 달라지는 실내 미세먼지 농도 특성을 비교한 결과는 Table 4.9와 같다. 실내 농도 그래프를 서로 비교해보면 매 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 마다 표시한 등농도선의 기울기는 모두 동일하고 등농도선 간의 간격이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 등농도선의 기울기는 실외 미세먼지 유입량과 관계가 있는데 Filtration 시스템의 풍량이나 필터 효율이 달라지더라도 실외 미세먼지 유입량은 변하지 않기 때문에 Filtration 제어 인자 변화에 따른 그래프의 기울기는 모두 동일하다.

Filtration 풍량이 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 인 경우(Table 4.9의 첫번째 행)에는 필터효율이 변화함에 따라 등농도선 간의 간격 변화가 거의 나타나지 않았다. 오염된 실내 공기가 필터링 되어 실내로 재순환 되는 양 자체가 작기 때문이다. 따라서 풍량이 작을 경우에는 고효율 필터 적용의 효과가 크지 않을 것으로 판단된다.

Filtration 효율이 0.35인 경우(Table 4.9의 첫번째 열)에도 풍량이 커짐에 따라 등농도선 간의 간격 변화가 크지 않았다. 저 효율 필터가 적용된 경우, 필터를 통해 미세먼지가 제거되는 비율이 낮아 풍량이 크더라도 깨끗한 공기 공급량 자체는 커지지 않기 때문이다.

본 연구의 Filtration 제어인자의 시뮬레이션 케이스 중 실내 미세먼지 농도 개선 효과가 큰 순서는 $\text{F600_0.95} > \text{F600_0.65} > \text{F400_0.95} > \text{F400_0.65} > \text{F600_0.35} > \text{F200_0.95} > \text{F400_0.35} > \text{F200_0.65} > \text{F100_0.95} > \text{F200_0.35} > \text{F100_0.65} > \text{F100_0.35}$ 이다. Filtration 제어 효과는 시스템을 통해 실내로 재순환 되는 깨끗한 공기의 양으로 결정되며, 깨끗한 공기 공급량은 시스템의 풍량에 필터 효율을 곱한 양이 된다.

Table 4.9 Influence of Q_f , η_f on indoor particle concentrations

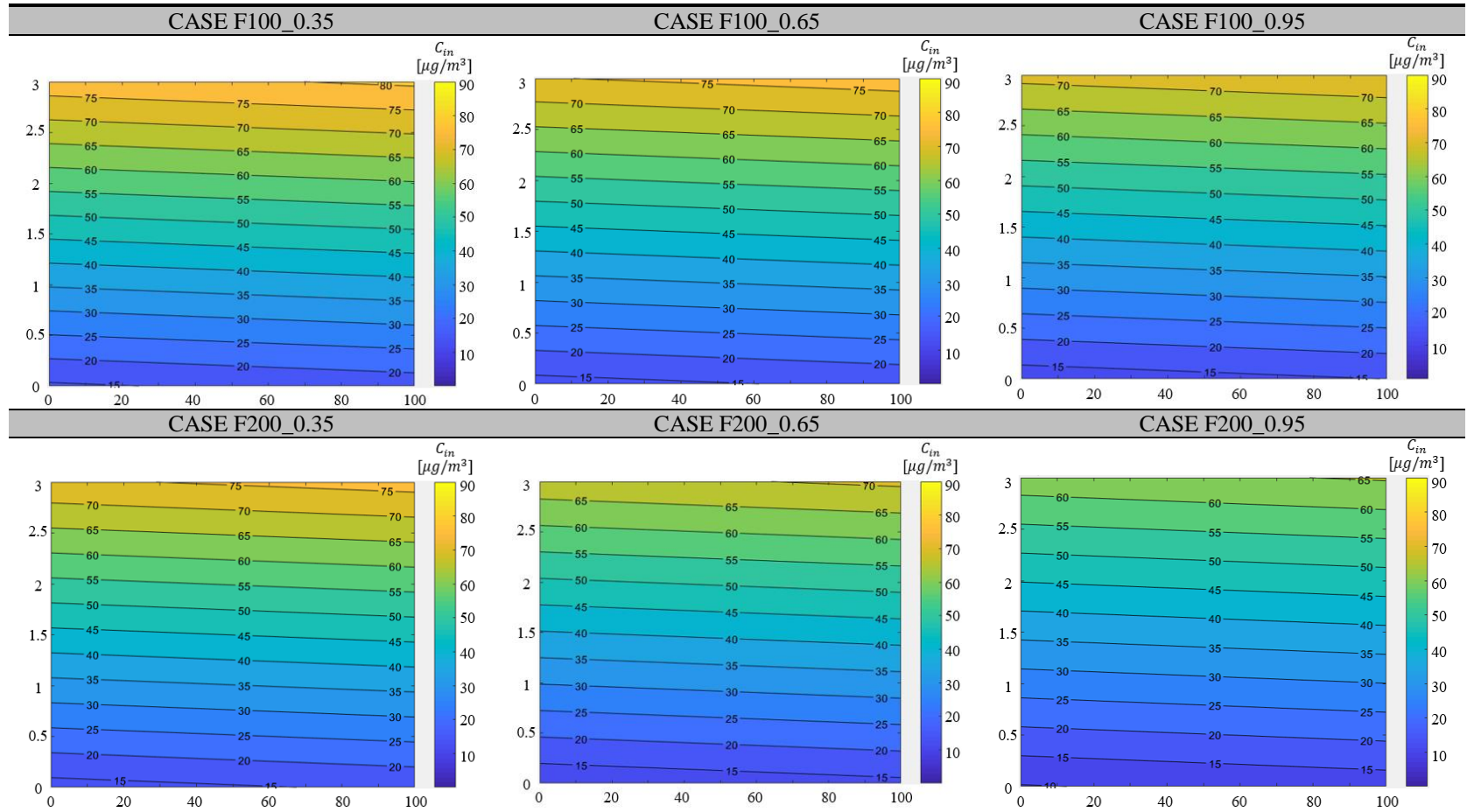
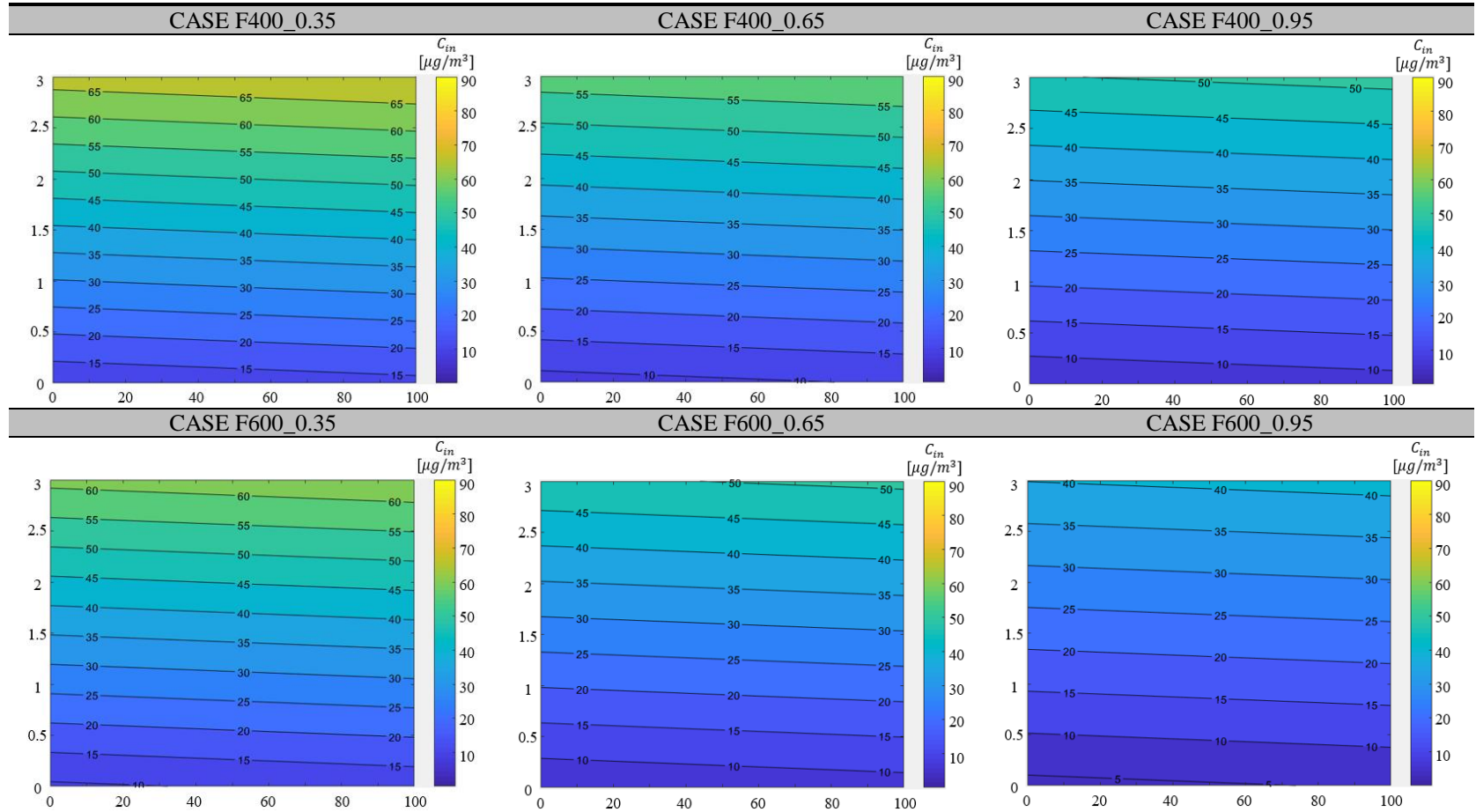


Table 4.9 Influence of Q_f , η_f on indoor particle concentrations (continued)



4.3 소결

실외 미세먼지 침투 및 실내 미세먼지 발생 조건에 따라 실내 미세먼지 농도를 평가하고 Ventilation과 Filtration에 의한 실내 미세먼지 농도 제어 효과를 파악하기 위해서 본 장에서는 환경조건 및 제어조건에 따른 실내 미세먼지 농도 변화를 분석하였다. 이를 위해 영향도 분석을 통해 영향도가 높은 인자를 주요 영향인자로 선정하고, 시뮬레이션 케이스 구성을 위해 주요 영향인자의 범위를 설정하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 주요 환경조건 및 제어관련 영향인자 변화에 따른 실내 농도특성을 비교 분석하였다. 본 장의 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 실내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 인자들을 대상으로 환경적으로 주어지거나 제어가 매우 어려운 인자는 환경조건 영향인자, 실내 미세먼지 농도를 줄이기 위해 인위적으로 제어 가능한 인자는 제어관련 영향인자로 분류하였다. 2^k factorial DOE (design of experiments)를 활용한 영향도 분석을 통해 환경조건 영향인자 중 실내 미세먼지 발생율과 실외 미세먼지 농도를 주요 인자로 도출하였다. 도출된 주요 환경조건 영향인자와 제어관련 영향인자를 주요 영향인자로 정하고 각각의 평가범위를 기존 연구를 참고하여 설정하였으며, 이를 시뮬레이션 케이스에 활용하였다.

(2) 실내 미세먼지 제어가 이루어지지 않는 자연상태의 공간에서 미세먼지 환경조건에 따른 실내 농도 특성을 비교하였다. 실내 농도 특성 비교는 실내 미세먼지 발생이 크고, 실외 미세먼지 침투 가능성이 낮은 조건과 반대로 실내 미세먼지 발생이 작고, 실외 미세먼지 침투 가능성이 높은 조건을 비교하였다. 분석 결과 실내 미세먼지 발생이 큰 조건에서는 실내 미세먼지 농도가 실내 발생에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 실내 미세먼지 발생이 작고, 실외 농도가 높은 경우의 실내 농도는 실외 미세먼지 농도에 의해서도 영향을 받지만, 실내 미세먼지 발생율이 실내 농도에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기밀 성능이 높은 국내 공동주택의 경우, 낮은 침기율로 인하여 실내 농도에 대한 실외 미세먼지의 영향이 상대적으로 작아지기 때문인 것으로 판단된다.

(3) Ventilation 제어 인자가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해서 Ventilation 풍량과 필터효율이 다른 케이스들을 비교 분석하였다. 분석 결과 필터효율의 경우, 효율이 높아질수록 실외 미세먼지 침투를 줄이고, 희석 효과를 높이는데 도움이 된다. 그러나, 환기풍량이 작을 때는 실내로 유입되는 외기 도입량 자체가 작기 때문에 필터효율의 효과가 크지 않은 것으로 확인 되었다. 환기풍량이 클 때는 실외 미세먼지 농도가 낮으면, 실내에서 발생된 미세먼지를 희석하는 효과가 크나 저효율 필터가 적용된 경우

에는 실외 미세먼지 농도가 높아짐에 따라 실내 농도가 급격히 높아진다. 따라서 풍량을 늘려 실내 농도를 희석 시키기 위해서는 저효율 필터보다는 중효율 등급 이상의 필터 적용이 요구된다.

- (4) Filtration 제어 인자가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하기 위해서 Filtration 풍량과 필터효율이 다른 케이스들을 비교 분석하였다. 분석 결과 풍량이 작을 때는 고효율 필터 적용의 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 오염된 실내 공기가 필터링 되어 실내로 재순환 되는 양 자체가 적기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 풍량이 커도 저효율 필터가 적용된 경우, 필터를 통해 미세먼지가 제거되는 비율이 낮기 때문에 역시 실내 농도 개선에 한계가 있는 것으로 확인 되었다. 특히, Filtration 제어는 필터효율이 클수록 풍량 증가에 따른 실내 미세먼지 농도 개선 효과가 더 커지므로 고효율 필터 적용이 유리하다.

제 5 장

Ventilation과 Filtration에 의한 실내 미세먼지 제어 전략

- 5.1 실내 미세먼지 제어 개념
 - 5.2 Ventilation과 Filtration 제어모드와 제어량 결정방법
 - 5.3 Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘 도출 및 적용
 - 5.4 소 결
-

4장의 인자 분석 결과로부터 실외와 실내의 미세먼지 환경조건에 따라 효과적인 제어방법이 달라질 수 있음을 파악하였다. 본 장에서는 변화하는 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 실내 미세먼지 농도를 목표 농도 이하로 유지하면서 기타 실내 발생 오염물질과 에너지 소비를 고려한 Ventilation과 Filtration 시스템 통합 제어 알고리즘을 도출하고 적용방법을 제시하였다. 이를 위하여 실내외 미세먼지 환경조건 별로 Ventilation과 Filtration 시스템 통합 최적 제어 개념을 정립한 후, 실내외 미세먼지 조건을 판단하고 해당조건에서의 제어를 결정하는데 도움을 줄 수 있는 커브를 제시하였다. 제시된 커브를 활용하여 환경조건 별 제어모드와 제어량 결정방법을 도출하고 이를 알고리즘화 하였다. 마지막으로 제어 알고리즘을 적용하기 위해 요구되는 시스템 구성 및 적용 절차를 수립하였다.

5.1 실내 미세먼지 제어 개념

미세먼지는 실외 농도 변화폭도 크고, 실내 농도 변화폭도 큰 특징이 있다. 국내 실외 미세먼지 농도는 $PM_{2.5}$ 를 기준으로 2015년 1월부터 2017년 6월까지 최저농도는 $2\mu g/m^3$ (2016년 10월 24일 광진구 측정소), 최고 농도는 $97\mu g/m^3$ (2017년 1월 3일 용산구 측정소)로 나타나 $0\sim 100\mu g/m^3$ 정도의 농도 변화폭을 보인다. 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 조리 또는 양초 연소 등의 연소 과정에 의해 $200\mu g/m^3$ 정도까지 농도가 증가할 수 있고⁸¹, 30분 이하의 짧은 발생 시간을 갖는 발생원이 많아 농도가 계속적으로 변화하는 특징을 보인다. 이와 같은 외부와 실내 미세먼지 농도의 변화는 실내외 미세먼지 농도의 상대적 크기가 수시로 역전될 수 있는 환경을 조성한다.

실내외 미세먼지 농도가 계속 역전되는 현상은 Ventilation 제어를 결정하는데 매우 중요한 요소이다. 실내 미세먼지 농도가 실외 미세먼지 농도보다 높을 경우에는 환기량을 늘려 희석효과를 최대화 하는 것이 실내 미세먼지 농도를 낮추는데 유리하고, 실외 미세먼지 농도가 실내보다 더 높을 때는 환기를 하지 않는 것이 실내 미세먼지 농도 측면에서 유리할 수 있다. 그러나 환기를 하지 않는 경우, 실내에서 발생하는 다른 오염물

⁸¹ 엄예슬, 강호빈, 최동희. 주거세대 내 재실행위가 실내 미세먼지 직경별 농도 상승에 미치는 영향. 2016 대한건축학회 추계학술발표대회논문집. 제36권 제2호. 2016; 1369-1370.

질의 농도를 높일 수 있다. 따라서, 실외 미세먼지 유입 차단이 유리한 경우에도 환기 기준에서 정하고 있는 최소 환기량을 확보하는 것이 전반적인 실내 공기질 관리를 위해 필요하다. 또한 제어모드와 제어량을 결정함에 있어 에너지에 대한 고려도 함께 이루어져야 한다.

본 연구에서 제안하고자 하는 Ventilation과 Filtration 제어의 목표는 첫째 실내 미세먼지 농도가 목표 농도 이하를 유지하도록 제어하고, 둘째 환기량을 줄이는 것이 미세먼지 제어에 유리하다더라도 기타 실내 발생 오염물질 관리를 위해 실에서 요구하는 최소 환기량을 확보하도록 하며, 셋째 앞의 두가지 목표를 만족시키면서 제어에 필요한 에너지를 최소화 하는 것이다. 이상의 제어의 목표를 다이어그램으로 나타내면 Fig. 5.1과 같다.

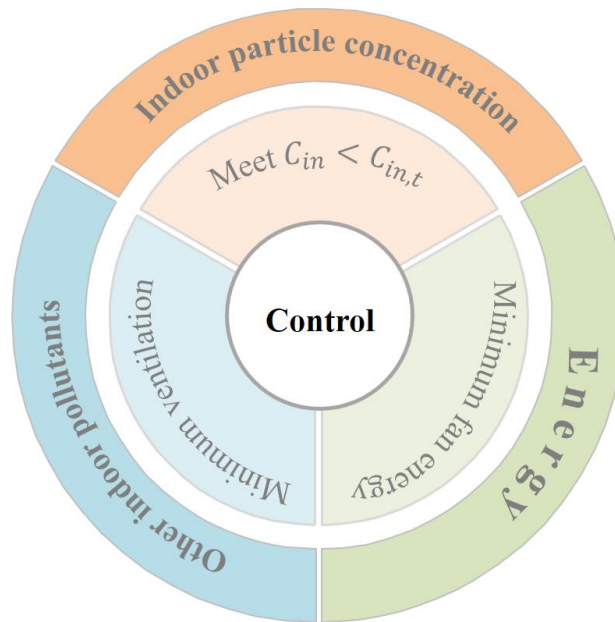


Fig. 5.1 Objective of ventilation and filtration control

5.1.1 환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어 개념

5.1.1.1 침투<<발생 조건에서의 미세먼지 제어 개념

미세먼지의 실내 발생이 많아 실내 농도가 높고, 실외 농도가 낮아 침투가 적은 환경조건에서는 환기량을 늘려 낮은 실외 농도로 실내에서 발생된 미세먼지로 인해 오염된 실내 공기를 희석시키는 것이 유리하다.

해당 환경조건에서는 환기량을 늘릴수록 실내 미세먼지 농도 개선에는 유리할 수 있지만 늘어난 환기량으로 인해 요구되는 에너지 역시 커지기 때문에 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 환기량을 Ventilation 제어량으로 정한다. 또한, 최소 환기(환기율 기준 $0.5h^{-1}$)와 함께 Filtration 제어를 하는 경우에 요구되는 에너지와 비교하여 두가지 모드 중 에너지가 최소가 되는 제어모드와 풍량을 결정한다. (Fig. 5.2 참조)

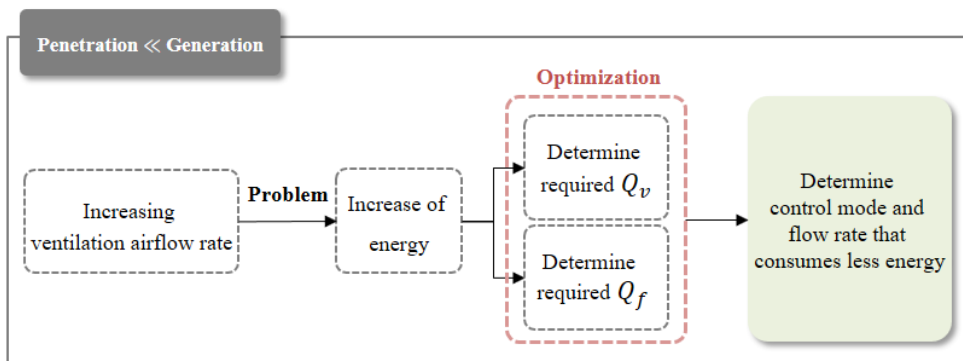


Fig. 5.2 Concept of control strategy (Penetration << Generation)

5.1.1.2 침투≫발생 조건에서의 미세먼지 제어 개념

미세먼지의 실외 농도가 높아 실외 미세먼지가 실내로 침투할 위험성이 높은 환경조건에서는 환기량을 줄여 실외 미세먼지의 실내 유입을 차단 시키는 것이 유리하다.

해당 환경조건에서는 환기를 하지 않는 것이 실내 미세먼지 농도 개선에는 유리할 수 있지만 환기를 하지 않는 경우, 기타 실내에서 발생하는 다른 오염물질의 농도가 높아져 실내 공기질이 악화될 수 있다. 따라서, 최소 환기량을 Ventilation 제어량으로 결정한다.

실외 농도가 높아 환기를 최소화 해야하는 조건에서 실내 발생에 의해 실내 농도가 목표 농도 이상이 될 때에는 Filtration 제어를 추가로 실시하고, 이때 Filtration 제어량은 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 풍량으로 결정한다. (Fig. 5.3 참조)

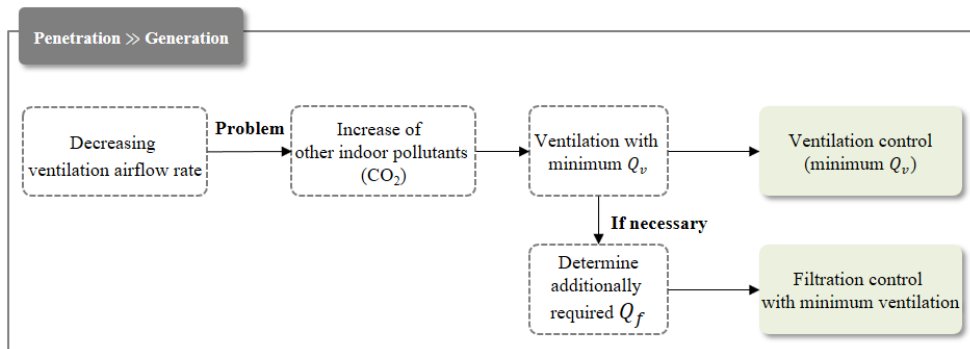


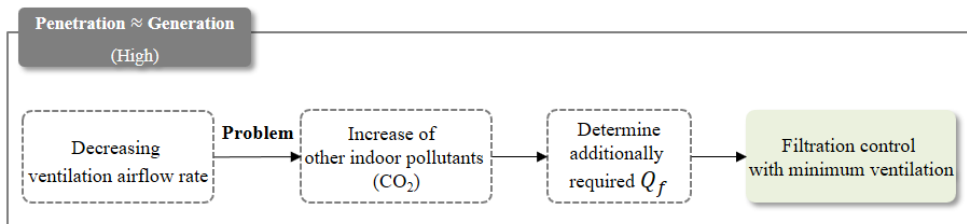
Fig. 5.3 Concept of control strategy (Penetration >> Generation)

5.1.1.3 침투≈발생 조건에서의 미세먼지 제어 개념

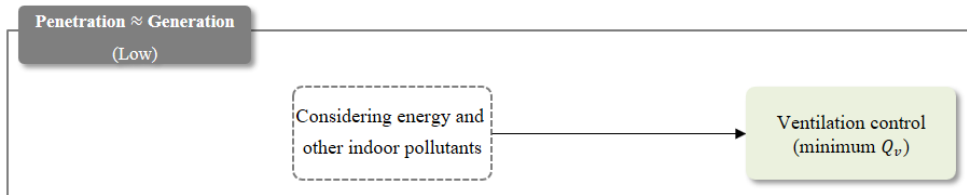
실외 미세먼지 농도가 높아 침투 위험성이 높고, 실내 발생도 많은 환경조건에서는 실외 미세먼지의 실내 유입 차단을 위해 환기량을 줄이되, 최소 환기량을 확보하도록 한다. 동시에 실내 발생 미세먼지 제거를 위해 반드시 Filtration 제어를 함께 실시한다. (Fig. 5.4 (a) 참조)

마지막으로, 실외 미세먼지 농도가 낮고, 실내 발생도 적어 미세먼지 제어가 불필요한 환경조건에서는 기타 다른 오염물질의 관리를 위해 최소 환기량으로 Ventilation 제어를 한다. (Fig. 5.4 (b) 참조)

이상과 같은 환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어 개념을 정리하면, Fig. 5.5와 같이 나타낼 수 있다.



(a) High penetration and high generation



(b) Low penetration and low generation

Fig. 5.4 Concept of control strategy (Penetration \approx Generation)

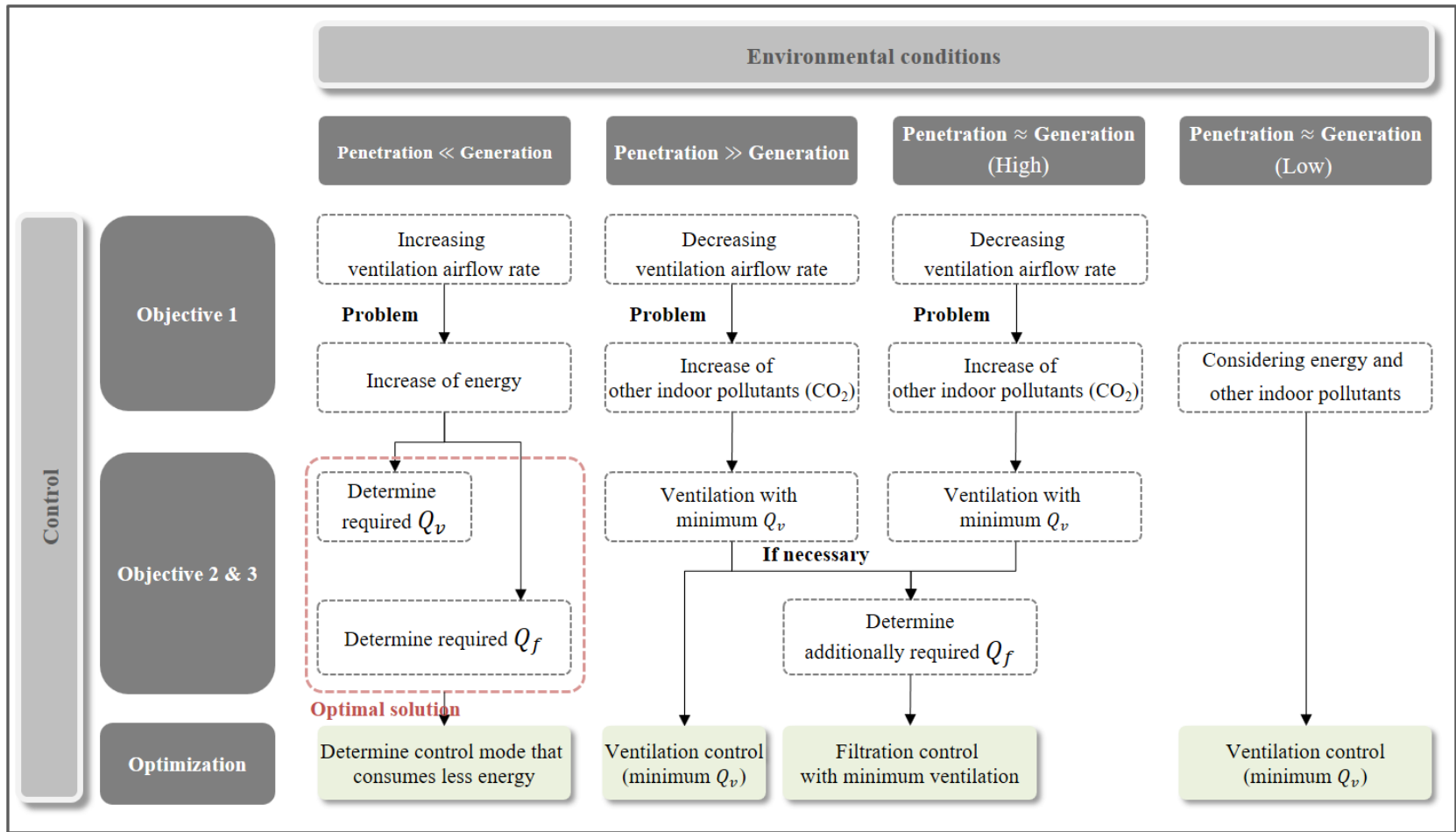


Fig. 5.5 Concept of control strategy considering environmental conditions

5.1.2 Control limit (CL) 커브를 활용한 제어 개념

5.1.1에서 제시한 제어의 개념을 적용하기 위해서는 제어의 방향을 결정할 수 있도록 환경조건을 판단할 수 있는 기준이 필요하다. 만일 환기 또는 공기청정 시스템 제어량에 따라 목표 실내 농도 이하로 유지 가능한 실내외 환경조건 범위를 파악할 수 있다면, 이 방법을 역으로 활용하여 환경조건에 따라 목표 실내 농도 이하로 유지하기 위한 시스템 제어량을 결정할 수 있을 것이다.

본 절에서는 환기량과 공기청정기 풍량에 따라 목표 실내 농도를 유지할 수 있는 실외 농도와 실내 발생을 조건의 범위를 파악할 수 있는 방법으로 Control limit(CL) 커브 개념을 설명하고, 이를 제어의 방향을 결정하는데 활용하고자 한다.

5.1.2.1 CL 커브

CL 커브는 4장의 인자분석에서 활용된 제어관련 영향인자 변화에 따른 실내 농도특성 그래프를 이용하여 도출할 수 있다. Fig 5.6은 4장의 Table 4.6와 같은 그래프에서 필터 효율이 0.65이고, 환기풍량을 $100\sim600\text{m}^3/\text{h}$ 로 변화시켰을 때, 실내 농도 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 해당하는 등농도선을 하나의 그래프에 표현한 것이다. 예를 들어, 붉은 색 점선으로 표시된 선은 필터 효율이 0.65이고, 풍량 $600\text{m}^3/\text{h}$ 으로 Ventilation 제어하였을 때, 실내 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 되는 한계선에 해당하며, 이 한계선의 x값과

y값은 해당 제어 적용시 실내 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 되는 실외 농도(x값)와 실내 발생율(y값)의 조합이 된다. 붉은 색 점선을 기준으로 점선 아래 영역은 $600\text{m}^3/\text{h}$ 로 운전시 실내 농도 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만을 유지할 수 있는 환경조건(실외 농도, 실내발생율)의 범위에 해당하며 점선 위부분은 실내 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 초과되는 환경조건의 범위가 된다.

환기량 증가에 따라 등농도선의 기울기가 커지고 등농도선이 모두 한 점에서 만나는 지점 (IP: Intersecting Point, 대략 $C_{out}=75\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, $G=700\ \mu\text{g}/\text{min}$)이 생기는 것을 확인할 수 있다. 해당 포인트를 지나는 수직선을 기준으로 왼편은 환기량을 증가 시킬수록 실내 농도를 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지할 수 있는 환경조건의 범위가 넓어지므로 환기가 유리한 구간이며, 오른편은 환기량을 증가시키면 실내 농도를 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지할 수 있는 환경조건의 범위가 오히려 좁아지므로 환기가 불리한 구간에 해당한다. 따라서, IP의 오른편 구간에서는 환기를 하지 않는 것이 유리하며 환기를 하더라도 최소한의 환기만 실시해야 한다.

만일, 실내에서 유지하고자 하는 목표 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최소 환기 기준에 해당하는 풍량이 $100\text{m}^3/\text{h}$ 인 공간에 최대 풍량 $600\text{m}^3/\text{h}$ 까지 제어할 수 있는 환기 시스템이 적용되어 있다면, Fig 5.6을 활용하여 해당 환기시스템으로 목표 농도 제어 가능한 환경 조건(Condition A in Fig 5.6)과 시스템의 용량을 늘리면 제어 가능한 환경 조건 (Condition B in Fig 5.6), 환기로는 목표 농도 유지가 불리(Condition C in Fig 5.6)하거나 불가능한 조건(Condition D in Fig 5.6) 등을 파악할 수 있다.

Fig 5.7은 4장의 Table 4.7과 같은 그래프에서 필터 효율이 0.95이고, 공기청정기 풍량을 $100\sim600\text{m}^3/\text{h}$ 으로 변화시켰을 때, 실내 농도 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 해당하는 등농도선을 하나의 그래프에 표현한 것이다. 예를 들어, 붉은 색 점선으로 표시된 선은 필터 효율이 0.95이고 풍량 $600\text{m}^3/\text{h}$ 으로 Filtration 제어하였을 때, 실내 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 되는 한계선에 해당하며, 붉은 색 점선을 기준으로 점선 아래 영역은 $600\text{m}^3/\text{h}$ 로 운전시 실내 농도 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만을 유지할 수 있는 환경조건, 점선 위부분은 실내 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 초과되는 환경 조건의 범위가 된다.

만일, 실내에서 유지하고자 하는 목표 농도가 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 최대 풍량 $600\text{m}^3/\text{h}$ 까지 제어할 수 있는 공기청정 시스템이 적용되어 있다면, Fig 5.7을 활용하여 해당 시스템으로 목표 농도 제어 가능한 환경 조건 (Condition A in Fig 5.7)과 시스템의 용량을 늘리면 제어 가능한 환경 조건 (Condition B in Fig 5.7)을 파악할 수 있다.

이와 같은 개념을 확장해서 Fig 5.6의 실에서 요구되는 최소 환기량 그리고 환기 시스템의 최대 풍량 제어시 실내 목표 농도에 해당하는 등농도선과 Fig. 5.7의 공기청정기의 최대 풍량 제어시 실내 목표 농도에 해당하는 등농도선을 하나의 그래프로 표현하면 Fig 5.8과 같은 그래프를 도출할 수 있는데, 이것이 CL 커브이다. CL 커브의 등농도선은 제어 한계선에 해당된다. 밑에서부터 Minimum ventilation limit은 실에서 요구되는 최소 환기량으로 Ventilation 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 제어 한계선(Control limit), Ventilation control limit은 환기 시스템의 최대 풍

량으로 Ventilation 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 제어 한계선(Control limit), Filtration control with minimum ventilation limit은 실에서 요구되는 최소환기량으로 Ventilation 제어하는 동시에 공기청정기의 최대 풍량으로 Filtration 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 제어 한계선(Control limit)이다. 세개의 제어 한계선에 의해 환경조건은 Zone A부터 E까지 5개의 환경조건 영역으로 구분되는데, 환경조건 영역(Condition zone)은 동일한 제어 개념을 적용시킬 수 있는 환경조건(Condition)들의 집합체이다.

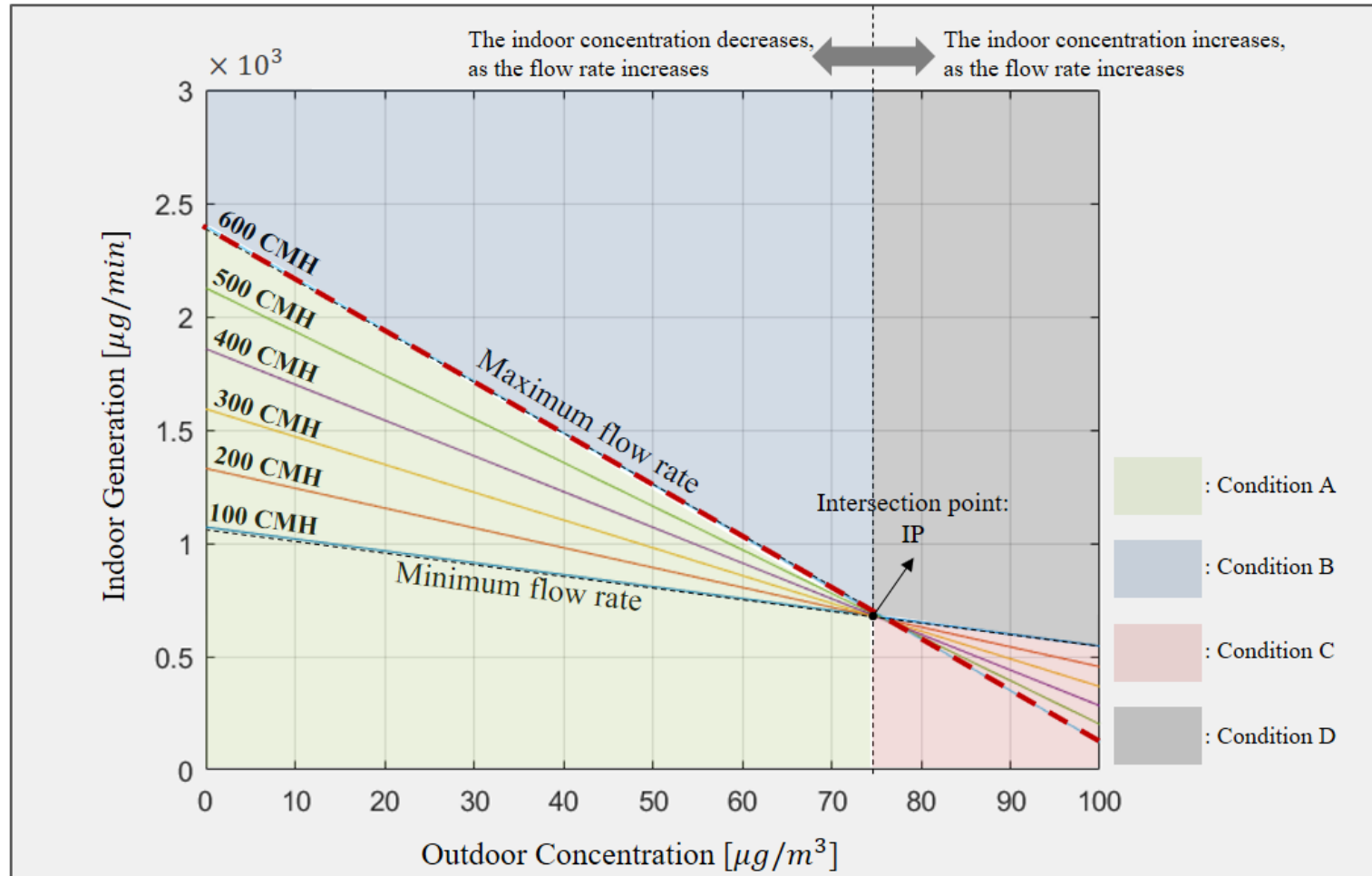


Fig. 5.6 Iso-lines of indoor concentration ($= 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) which ventilation flow rates change from 100 to 600 m^3/h ($\eta_v = 0.65$)

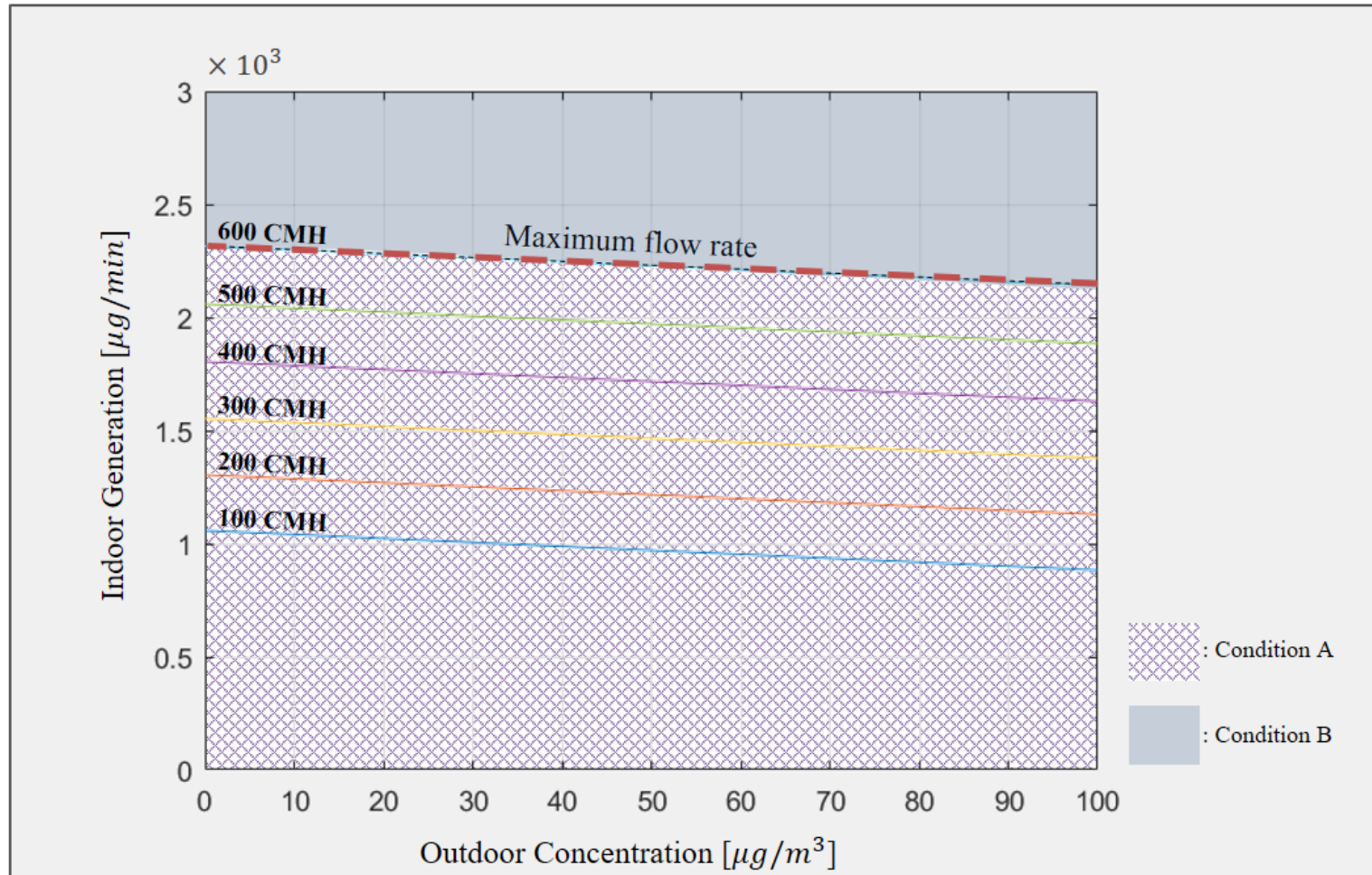


Fig. 5.7 Iso-lines of indoor concentration ($= 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) which filtration flow rates change from 100 to 600 m^3/h ($\eta_v = 0.95$)

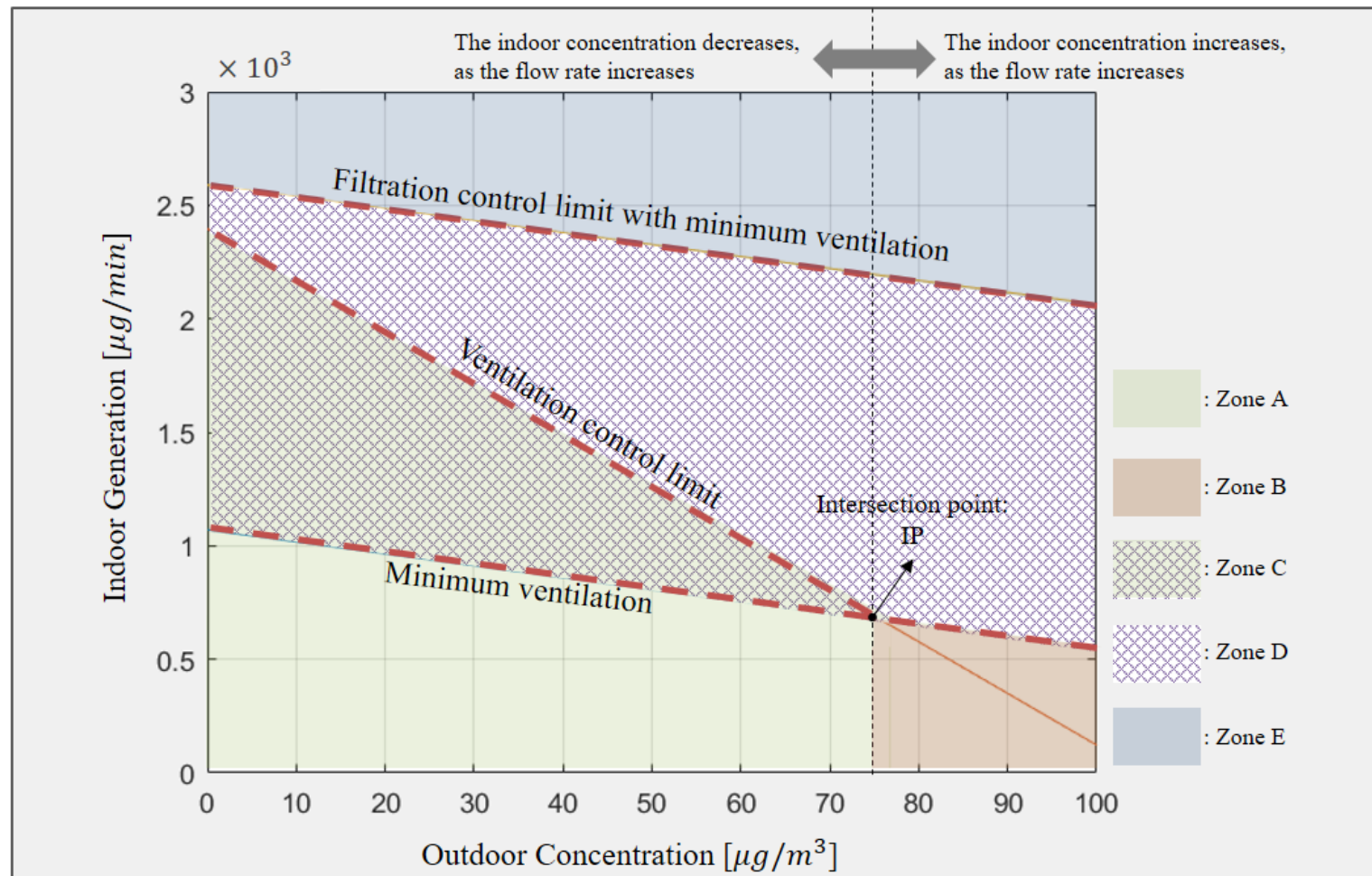


Fig. 5.8 Control limit (CL) curve

5.1.2.2 CL 커브의 존 별 제어 방향

CL 커브에서 환경조건은 Table 5.1에서와 같이 5개의 존으로 영역을 구분할 수 있다. 각 존은 제어 한계선에 의해 영역이 나뉘어 지며, 각 존에 해당하는 환경조건에서는 동일한 제어 개념을 적용하여 제어 방향을 정할 수 있다. 각 존을 구분 짓는 제어 한계선과 존 별 제어 방향은 다음과 같다.

Zone A와 B는 Minimum ventilation limit을 경계로 IP를 지나는 수직선의 왼편(Zone A)과 오른편(Zone B)의 영역이다. Minimum ventilation limit은 실에서 요구되는 최소 환기량으로 Ventilation 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 등농도선이며, IP를 지나는 수직선은 Ventilation 제어의 유효를 결정짓는 경계이다. Zone A는 최소 환기량으로 실내 목표 농도 이하를 유지할 수 있는 영역이므로, 해당 존의 환경조건에서는 최소 환기량으로 제어하는 것이 바람직하다. Zone B는 최소 환기량으로 실내 목표 농도 이하를 유지하는 것이 가능하나 환기량을 줄일수록 실내 미세먼지 농도를 낮출 수 있는 영역이다. 그러나, 실내의 기타 다른 오염물질의 관리를 위해서 해당 존의 환경조건에서는 최소 환기량으로 제어하도록 한다.

Zone C는 Minimum ventilation limit과 Ventilation control limit 선을 경계로 하는 환경조건이다. Ventilation control limit은 환기 시스템의 최대 환기량으로 Ventilation 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 등농도선이다. Zone C는 최소 환기량보다는 크고 최대 환기량 이하에서 실내 목표 농도

이하를 유지할 수 있는 영역인 동시에 Filtration 제어에 의해서도 실내 목표 농도 이하를 유지할 수 있는 영역이다. 해당 존의 환경조건에서는 Ventilation 제어 또는 최소 환기가 병행된 Filtration 제어 중 실내 목표 농도 이하를 유지하면서 에너지를 최소화 할 수 있는 제어를 하는 것이 바람직하다.

Zone D는 Minimum ventilation limit과 Ventilation control limit, 그리고 Filtration control with minimum ventilation limit 선을 경계로 하는 환경조건이다. Filtration control with minimum ventilation limit 은 실에서 요구되는 최소 환기량으로 Ventilation 제어하는 동시에 공기청정기의 최대 풍량으로 Filtration 제어 시 실내 목표 농도를 유지할 수 있는 등농도선이다. 해당 존의 환경조건에서는 최소 환기를 병행한 Filtration 제어로 실내 목표 농도 이하를 유지하도록 한다.

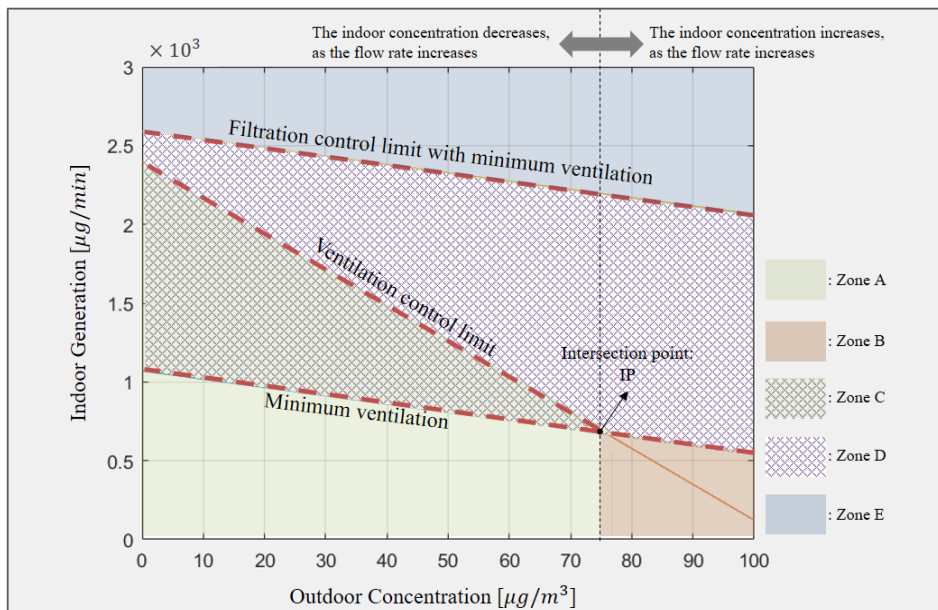
Zone E는 Filtration control with minimum ventilation limit 경계 밖의 환경조건이다. 해당 존의 환경조건에서는 적용된 시스템으로는 실내 농도를 목표 농도 이하를 유지할 수 없다. 이 영역에 해당하는 환경조건에서는 최소 환기와 동시에 최대 풍량으로 Filtration 제어를 하는 것이 바람직하다.

이상과 같이 CL 커브는 제어의 방향을 결정할 수 있는 환경조건을 판단하는 기준으로 활용 가능하며, Fig 5.5의 환경조건 별로 CL 커브의 Zone 을 각각 대입하면 Fig. 5.9와 같이 나타낼 수 있다. CL 커브로 5.1.1에서 제시한 환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어 개념을 명확하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5.1 Control direction of each environmental condition zone in CL curve

Condition	Control direction
Zone A	Minimum ventilation control
Zone B	Minimum ventilation control
Zone C	Ventilation or Filtration control that consumes less energy
Zone D	Filtration control with minimum ventilation
Zone E	Maximum filtration control with minimum ventilation

< CL curve >



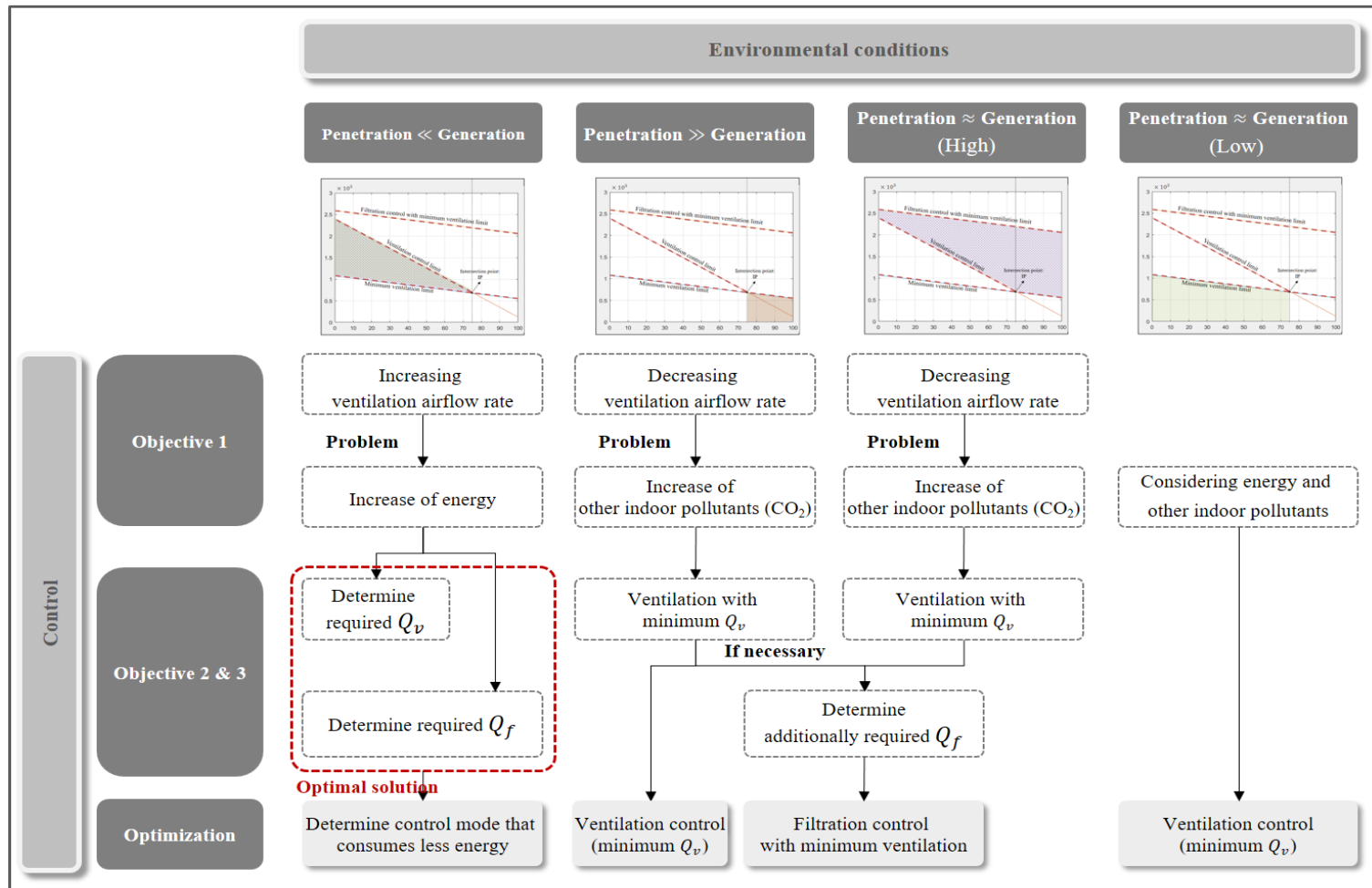


Fig. 5.9 Concept of control strategy with specified environmental conditions using control limit (CL) curve

5.2 Ventilation과 Filtration 제어모드와 제어량 결정방법

5.1절에서 제시된 CL 커브 통해 Condition zone 별로 제어하는 개념을 알고리즘화 하기 위해서는 개념적 판단이 수학적으로 성립되어야 한다. 본 절에서는 연산이 가능한 알고리즘을 도출하기 위하여 개념을 수식화 하는 과정을 포함하고 있으며, 수식화된 개념은 Fig 5.10과 같은 절차를 거쳐 제어 모드와 제어량을 결정할 수 있다. 먼저 현재의 환경조건을 파악해야한다. 그 다음으로 환경조건이 CL 커브에서 어느 Condition zone에 해당 하는지 파악하여 해당 Condition zone의 제어 개념에 따라 제어 모드와 제어량을 결정한다.

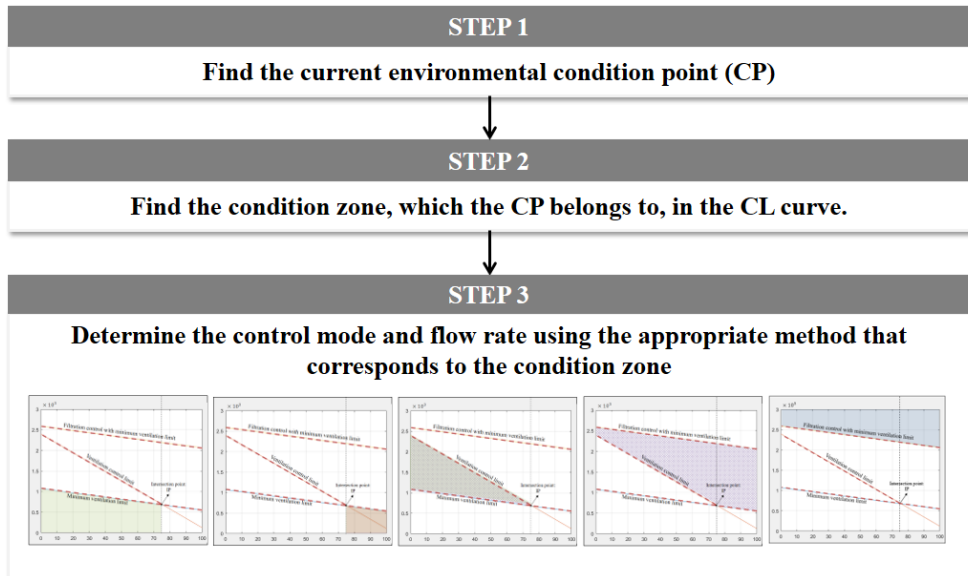


Fig. 5.10 Process for determination of control mode and flow rate of system

5.2.1 환경조건 파악 (Step 1 & 2)

5.2.1.1 Step 1: Condition point (CP) 파악

CL 커브를 활용한 제어 개념을 적용하기 위해서는 현재의 환경조건을 먼저 파악 해야한다. 여기서 환경조건은 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생율이다. 실외 미세먼지 농도는 농도 센서를 통해 측정한 값을 직접 대입하고, 실내 미세먼지 발생율은 측정된 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 농도 값을 활용하여, 3장에서 구축한 발생량 해석 모델로 예측한다. CL 커브에서 x축 값은 측정된 실외 미세먼지 농도, y축 값은 예측된 실내 미세먼지 발생율로하는 하나의 점을 정할 수 있으며, 이 점이 해당 제어 스텝의 Condition point (CP)가 된다.

5.2.1.2 Step 2: CL 커브에서 CP의 Condition zone 파악

CL 커브의 Condition zone 별 제어 개념을 적용하기 위해서는 현재의 CP가 어느 Condition zone에 해당하는지 파악하여야 한다. Condition zone은 제어 한계선(Control limit)에 의해 둘러싸인 구역이므로, CP가 어느 Condition zone에 해당하는지는 제어 한계선에 의해 정의될 수 있다.

예를 들어 Fig. 5.11과 같이 $Y = f^1(X)$ 인 선과 $Y = f^2(X)$ 인 선에 의해 구분되는 A, B, C 세 영역 중 임의의 점(X_p, Y_p)이 속한 영역을 찾기 위해서는 다음과 같은 관계식에 의해 판단할 수 있다.

- $f^1(X_p) < Y_p$ 이면, 임의의 점(X_p, Y_p)는 A 영역에 속한다.
- $f^2(X_p) < Y_p < f^1(X_p)$ 이면, 임의의 점(X_p, Y_p)는 B 영역에 속한다.

- $Y_p < f^2(X_p)$ 이면, 임의의 점(X_p, Y_p)는 C 영역에 속한다.

제어 한계선과의 관계식으로 CL 커브에서 CP 점이 속한 Condition zone을 판단하기 위해서는 CL 커브의 제어 한계선의 함수를 구한 후, 이 함수들과 CP 점과의 관계식으로 나타내야 한다. 제어 한계선의 함수는 식 (3.14)의 실내 농도에 목표 실내 농도 값($C_{in,t}$)을 입력하고, 각 제어 한계선에 해당하는 시스템 풍량($Q_{v,min}$, $Q_{v,max}$, or $Q_{f,max}$)을 입력하여 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 구한 각 제어 한계선의 함수는 Table 5.2와 같이 도출할 수 있으며, 도출된 제어 한계선 함수로부터 CP 점이 CL 커브의 어느 존에 속하는지는 Table 5.3과 같은 관계식에 의해서 판단할 수 있다.

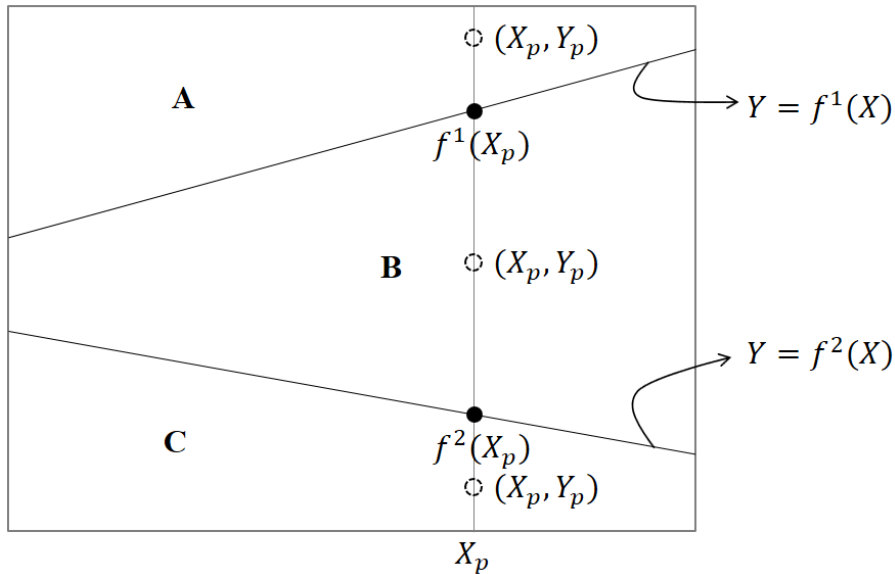
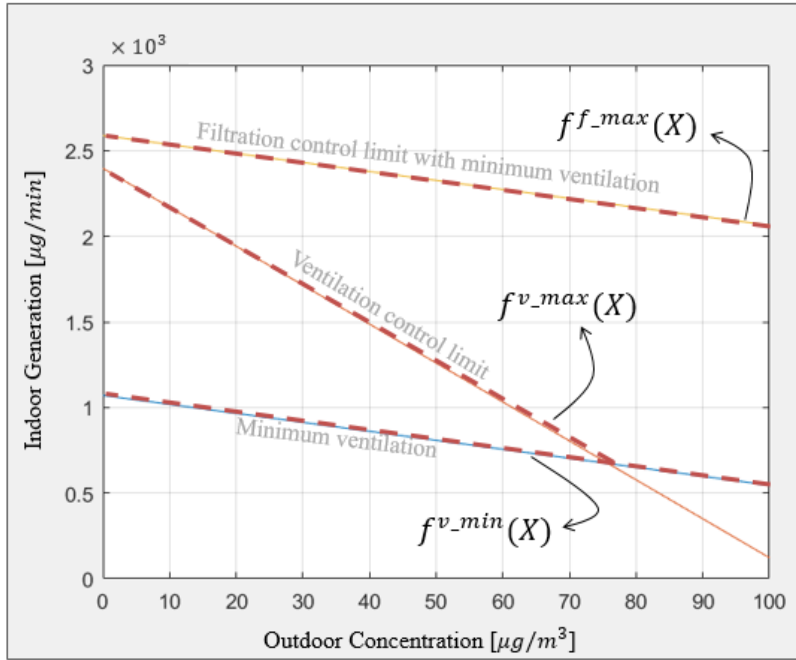


Fig. 5.11 Concept of finding out where an arbitrary point belongs

Table 5.2 Formulas of three control limits in CL curve



$$fv_{min}(X) = -(Q_{v,min}(1 - \eta_v) + V \cdot P \cdot \lambda)X + \left(V \cdot \varphi \left(\frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1} e^{-\varphi t}}{1 - e^{-\varphi t}} \right) \right)$$

$$\varphi = \frac{Q_{v,min}}{V} + k + \lambda$$

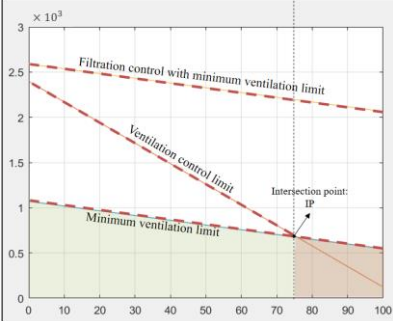
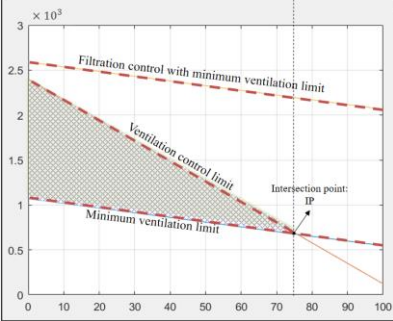
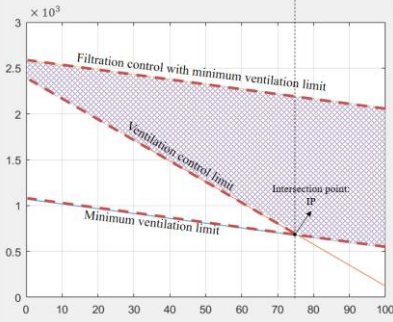
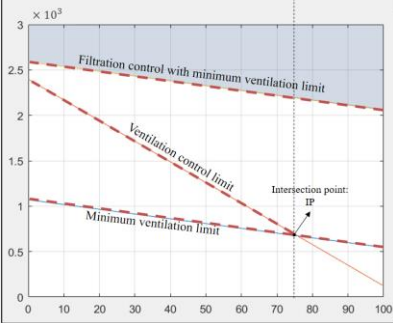
$$fv_{max}(X) = -(Q_{v,max}(1 - \eta_v) + V \cdot P \cdot \lambda)X + \left(V \cdot \varphi \left(\frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1} e^{-\varphi t}}{1 - e^{-\varphi t}} \right) \right)$$

$$\varphi = \frac{Q_{v,max}}{V} + k + \lambda$$

$$ff_{max}(X) = -(Q_{v,min}(1 - \eta_v) + V \cdot P \cdot \lambda)X + \left(V \cdot \varphi \left(\frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1} e^{-\varphi t}}{1 - e^{-\varphi t}} \right) \right)$$

$$\varphi = \frac{Q_{v,min}}{V} + k + \lambda + \eta_f \frac{Q_{f,max}}{V}$$

Table 5.3 Discriminating equation for finding out where CP belongs

Condition zone where CP belongs to	Condition zone discriminant
	$CP(X_{cp}, Y_{cp}) \subset$ $Y_{cp} \leq f^{v_min}(X_{cp})$ <p>Zone A or B</p>
	$CP(X_{cp}, Y_{cp}) \subset$ $f^{v_min}(X_{cp}) < Y_{cp} \text{ and }$ $Y_{cp} \leq f^{v_max}(X_{cp})$ <p>Zone C</p>
	$CP(X_{cp}, Y_{cp}) \subset$ $f^{v_min}(X_{cp}) < Y_{cp},$ $f^{v_max}(X_{cp}) < Y_{cp} \text{ and }$ $Y_{cp} \leq f^{f_max}(X_{cp})$ <p>Zone D</p>
	$CP(X_{cp}, Y_{cp}) \subset$ $f^{f_max}(X_{cp}) < Y_{cp}$ <p>Zone E</p>

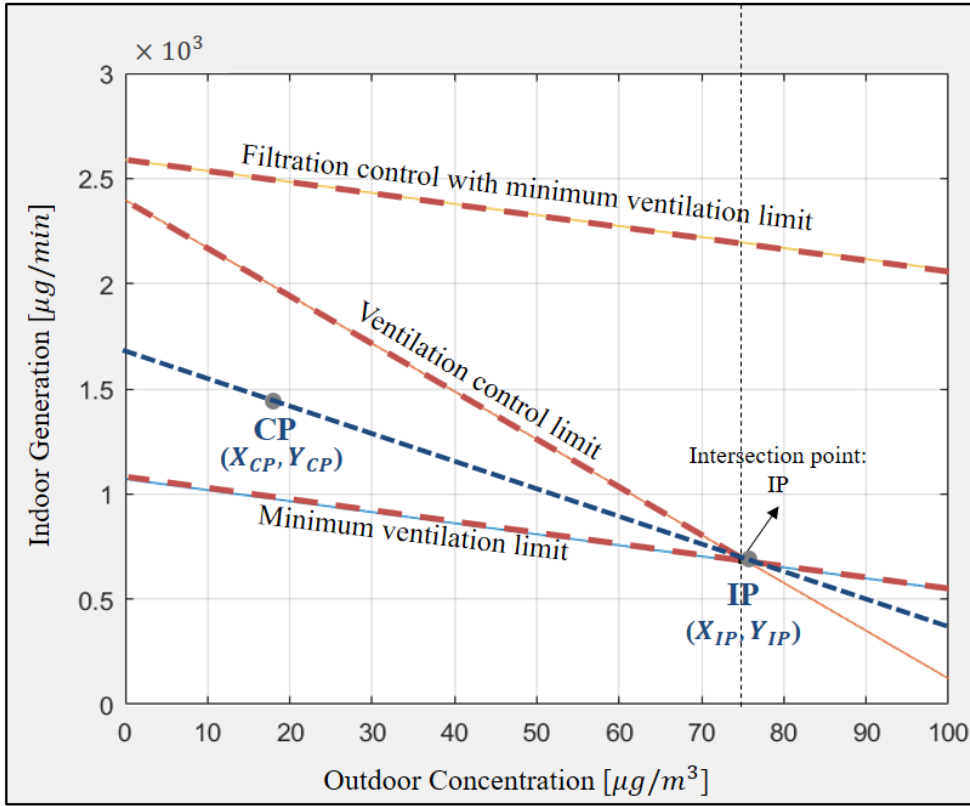
5.2.2 환경조건 별 제어모드와 제어량 결정방법 (Step 3)

해당 제어구간의 CP를 파악하고(Step 1), CP가 CL 커브의 어느 Condition zone에 포함되는지를 파악하게되면(Step 2), 이 단계에서 CP가 Condition zone A, B, 또는 E에 포함되는 경우에는 제어모드와 제어량이 바로 결정이 된다. 하지만, Condition zone D에 포함되는 경우에는 최소 환기 +Filtration 제어로 제어모드는 결정되나, 실내 목표 농도 유지를 위해 요구되는 공기청정기 풍량($Q_{f,req}$)을 구해야 한다. Condition zone C에 포함되는 경우에는 Ventilation 제어와 Filtration 제어가 모두 가능하므로, 각 경우 요구되는 풍량($Q_{v,req}$, $Q_{f,req}$)을 구한 후, 해당 풍량으로 운전시 에너지를 비교하여 최소가 되는 제어모드와 풍량으로 결정하여야 한다.

본 절에서는 CL 커브를 활용하여 실내 목표 농도 유지를 위해 각 시스템에서 요구되는 풍량을 계산할 수 있는 방법과 계산된 풍량으로 운전할 때 요구되는 에너지를 계산하는 방법에 대해서 기술하였다.

5.2.2.1 CL 커브에서의 $Q_{v,req}$ 계산 방법 (2 points method)

CP가 Condition zone C에 속했을 때, Ventilation 제어를 하기 위해서는 실에서 요구되는 최소 풍량 보다는 크고, 시스템의 최대 풍량 보다는 작은 풍량이 필요하다. CL 커브에서 풍량 변화에 따라 실내 목표 농도에 해당하는 등농도선을 그리면 Fig 5.6에서와 같이 등농도선은 Intersecting point를 반드시 지나간다. 따라서 CP가 정해지면, 실내 목표 농도를 유지하기 위해 최소로 요구되는 환기량은 Fig 5.12와 같이 CP와 IP를 지나는 선의

Fig. 5.12 Concept of 2 points method for obtaining $Q_{v,req}$

함수로부터 구할 수 있다.

CP와 IP를 지나는 선의 함수는 CP를 알고 있으므로, IP를 알면 구할 수 있다. IP는 Minimum ventilation limit 선과 Ventilation control limit 선이 만나는 점(X_{IP}, Y_{IP})으로서, $f^{v.min}(X_{IP}) = f^{v.max}(X_{IP})$ 의 관계로부터 연립방정식을 풀면 다음 식(5.1)과 같이 구할 수 있다.

$$X_{IP} = \frac{I_{max} - I_{min}}{S_{max} - S_{min}}, Y_{IP} = \frac{S_{min} \cdot I_{max} - S_{max} \cdot I_{min}}{S_{min} - S_{max}} \quad (5.1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} I_{max} &= V\varphi\left(\frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1}e^{-\varphi t}}{1 - e^{-\varphi t}}\right), \quad \varphi = \frac{Q_{v,max}}{V} + k + \lambda \\ I_{min} &= V\varphi\left(\frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1}e^{-\varphi t}}{1 - e^{-\varphi t}}\right), \quad \varphi = \frac{Q_{v,min}}{V} + k + \lambda \\ S_{max} &= Q_{v,max}(1 - \eta_v) + P \cdot V \cdot \lambda \\ S_{min} &= Q_{v,min}(1 - \eta_v) + P \cdot V \cdot \lambda \end{aligned}$$

실내 목표 농도를 유지하기 위해 최소로 요구되는 환기량 $Q_{v,req}$ 는 구해진 $CP(X_{CP}, Y_{CP})$ 와 $IP(X_{IP}, Y_{IP})$ 로부터 다음 식 (5.2)에 의해 구할 수 있다.

$$Q_{v,req} = \frac{1}{1 - \eta_v} \cdot \left[\frac{Y_{CP} - Y_{IP}}{X_{IP} - X_{CP}} - P \cdot V \cdot \lambda \right] \quad (5.2)$$

여기서,

$Q_{v,req}$	Required ventilation flow rate [m^3/h]
Y_{CP}	: Y value of CP point, Indoor generation rate [$\mu g/h$]
X_{CP}	X value of CP point Outdoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
Y_{IP}	: Y value of IP point, Indoor generation rate [$\mu g/h$]
X_{IP}	X value of IP point Outdoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
η_v	: Particle removal efficiency of the ventilation system [-]
P	: Penetration coefficient [-]
λ	: Infiltration rate [$1/h$]
V	: Room volume [m^3]

5.2.2.2 CL 커브에서의 $Q_{f,req}$ 계산 방법 (Slop & 1point method)

CP가 Condition zone C 또는 D에 속했을 때, 최소 환기+Filtration 제어를 통해 실내 목표 농도를 유지하기 위해서 최소로 요구되는 공기청정 시스템의 풍량은 CP를 지나는 선의 함수로부터 구할 수 있다. CL 커브에서 공기청정 시스템 풍량 변화에 따라 실내 목표 농도에 해당하는 등농도선을 그리면 Fig 5.7에서와 같이 등농도선은 동일한 기울기를 갖는다. 따라

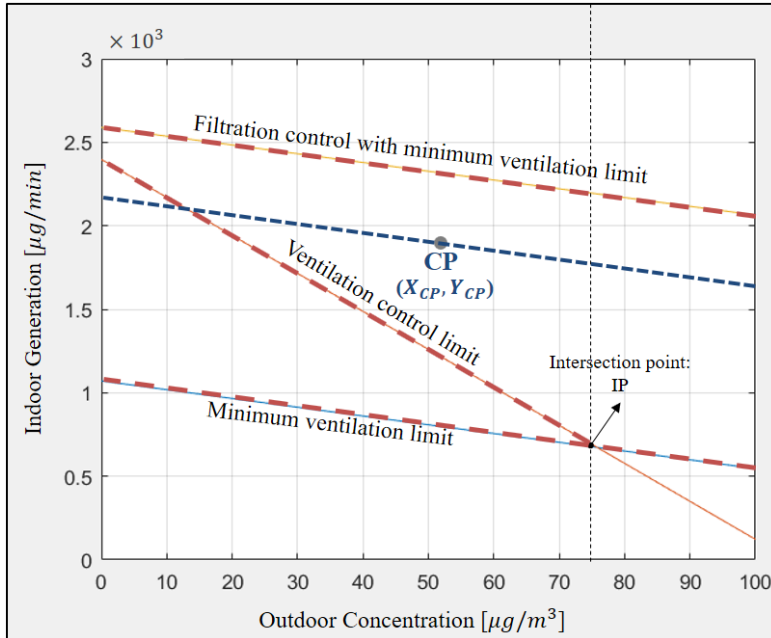
서 CP가 정해지면, 실내 목표 농도를 유지하기 위해 최소로 요구되는 공기청정기의 풍량은 Fig 5.13과 같이 Filtration control with minimum ventilation limit 선과 동일한 기울기를 갖고 CP를 지나는 선의 함수로 다음 식(5.3)에 의해 구할 수 있다.

$$Y_{CP} = (Q_{v,min}(1 - \eta_v) + VP\lambda)X_{CP} + V\varphi \cdot \frac{C_{in,t} - C_{in}^{i-1}e^{-\varphi t}}{(1 - e^{-\varphi t})}, \quad (5.3)$$

$$\varphi = \frac{Q_{v,min}}{V} + k + \lambda + \eta_f \frac{Q_{f,req}}{V}$$

여기서,

$Q_{f,req}$	Required filtration flow rate [m^3/h]
$Q_{v,min}$: Minimum ventilation flow rate [m^3/h]
Y_{CP}	: Indoor generation rate [$\mu g/h$]
X_{CP}	Outdoor particle concentration [$\mu g/m^3$]
$C_{in,t}$	Indoor particle concentration at time t [$\mu g/m^3$]
C_{in}^{i-1}	Indoor particle concentration at time step $i-1$ [$\mu g/m^3$]
η_v	: Particle removal efficiency of the ventilation system [-]
η_f	Particle removal efficiency of the filtration system [-]
k	: Deposition rate [$1/h$]
P	: Penetration coefficient [-]
λ	: Infiltration rate [$1/h$]
V	: Room volume [m^3]
t	: Time [h]

Fig. 5.13 Concept of slop & 1 point method for obtaining $Q_{f,req}$

5.2.2.3 에너지가 최소가 되는 제어모드 및 제어량 결정방법

CP가 Condition zone C에 속한 경우에는 Ventilation 제어 또는 최소 환기 + Filtration 제어 방식 모두 실내 목표 농도 유지가 가능하다. 따라서, 각 제어 방식에 요구되는 풍량($Q_{v,req}$, $Q_{f,req}$)을 2 points method($Q_{v,req}$) 또는 Slop & 1point method($Q_{f,req}$)로 구한 후, 해당 풍량으로 운전시 필요한 에너지를 비교하여 에너지가 적게 요구되는 제어모드와 풍량으로 결정한다.

요구되는 에너지는 환기 시스템의 경우, 팬동력과 환기 부하에 의한 냉난방 에너지 등이 있고, 공기 청정기의 경우, 팬동력이 있다. 환기 부

하에 의한 냉난방 에너지를 구하기 위해서는 또 다른 복잡한 에너지 계산을 필요로 한다. 본 연구에서는 제어의 모드를 선택하기 위한 판단 도구로서 에너지를 비교하는 것을 목적으로 하고 있으므로, 팬동력으로 간단히 비교하고자 한다. 만일 냉난방 에너지 또는 장시간 운전 등에 의한 필터 비용까지 비교하고자 하는 경우에는 본 단계에서 연구자가 원하는 에너지 또는 비용을 계산하는 모델을 추가하면 된다.

본 연구에서 비교하는 팬 구동에 필요한 에너지는 앞서 구한 각 시스템의 풍량을 바탕으로 다음 식(5.4) ~ (5.7)로 구한다. 식(5.5)와 (5.7)로 구한 Ventilation 제어에 따른 에너지와 Filtration 제어에 따른 에너지를 비교하여 에너지가 적게 요구되는 제어모드와 제어량으로 제어를 결정한다.

$$W_{v,req} = \frac{Q_{v,req} \times \Delta P_v}{3,600 \times F_{v,eff}} \quad (5.4)$$

$$E_{v,req} = W_{v,req} \times T_v \quad (5.5)$$

$$W_{f,req} = \frac{Q_{f,req} \times \Delta P_f}{3,600 \times F_{f,eff}} \quad (5.6)$$

$$E_{f,req} = W_{f,req} \times T_f \quad (5.7)$$

여기서,

$W_{v,req}$:	Fan power of ventilation system [W]
$W_{f,req}$:	Fan power of filtration system [W]
$Q_{v,req}$:	Required ventilation flow rate [m^3/h]
$Q_{f,req}$:	Required filtration flow rate [m^3/h]
ΔP_v	:	Pressure drop of ventilation system [Pa]
ΔP_f	:	Pressure drop of filtration system [Pa]
$F_{v,eff}$:	Ventilation fan efficiency [-]
$F_{f,eff}$:	Filtration fan efficiency [-]
$E_{v,req}$:	Fan energy of ventilation system [Wh]
$E_{f,req}$:	Fan energy of filtration system [Wh]
T_v	:	Ventilation fan operating time [h]
T_f	:	Filtration fan operating time [h]

5.3 Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘 도출 및 적용

5.3.1 Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘 도출

앞서 서술한 환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어 방안들을 중심으로 제어모드와 제어량을 결정하기 위한 프로세스를 요약하면 다음과 같다.

(1) Inputs

- 제어를 위한 입력 변수는 엔지니어가 미리 입력하는 변수와 센서에 의해 측정하는 변수로 구분.
- 엔지니어 입력 변수: 실부피, 침투계수, 침착율, 침기율, 환기 시스템과 공기청정 시스템 최대 풍량, 실에서 요구되는 최소 환기량.
- 센서에 의해 측정하는 변수: 실내 미세먼지 농도, 실외 미세먼지 농도.

(2) Find the current environment condition point (CP)

- Condition point는 해당 제어 스텝에서의 환경조건에 해당하며, x축 값은 실외 미세먼지 농도 y축 값은 실내 미세먼지 발생율임.
- CP의 x축 값은 센서에 의해 측정된 실외 미세먼지 농도이며, y축 값인 실내 미세먼지 발생율은 센서에 의해 측정된 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 농도로 예측.

(3) Find the condition zone, which the CP belongs to, in the CL curve

- CP가 CL 커브의 Condition zone A~E 중 어느 존에 속하는지 판단.

CL curve: 제어 한계선(Control limit)들과, 제어 한계선에 의해 구분되는 환경조건 영역(Condition zone) 등의 정보를 포함.

- CP가 속해 있는 Condition zone의 파악은 CP와 제어 한계선과의 관계식에 의해 판단.

(4) Determine the control mode and flow rate using the appropriate method that corresponds to the condition zone

- CP가 속해 있는 Condition zone A~E에 따라 제어모드와 제어량을 결정.
- CP in Condition zone A: 실외 농도와 발생율이 낮은 환경 조건으로, 최소 환기량 만으로 실내 목표 농도 유지 가능하며 환기가 유리. Ventilation mode(Minimum flow rate)
- CP in Condition zone B: 실외 농도는 높고 발생율이 낮은 환경 조건으로, 최소 환기량으로 실내 목표 농도 이하 유지 가능하나 환기가 불리한 영역. 기타 실내 발생 오염물질 관리를 위해 최소 환기 필요. Ventilation mode(Minimum flow rate)
- CP in Condition zone C: 실외 농도는 낮고 발생율이 높은 환경 조건으로, Ventilation 제어 또는 최소 환기+Filtration 제어로 실내 목표 농도 이하 유지 가능. 실내 목표 농도 유지가 가능한

필요 환기량 또는 최소 환기+필요 공기청정 풍량을 각각 2points method 또는 Slope & 1 point method로 계산 후, 계산된 풍량으로 운전시 에너지 요구량이 최소가 되는 제어모드와 제어 풍량으로 결정. Ventilation mode(Required flow rate) 또는 Filtration mode(Required flow rate)+ Ventilation mode(Minimum flow rate)

- CP in Condition zone D: 실외 농도도 높고 발생율도 높은 환경 조건으로 환기로는 실내 목표 농도 유지가 불가능. 실내 목표 농도 유지가 가능한 공기청정 시스템의 풍량을 Slope & 1 point method로 계산. Filtration mode(Required flow rate)+Ventilation mode(Minimum flow rate)
- CP in Condition zone E: 적용된 시스템의 운전으로는 실내 목표 농도 유지가 불가능하므로, 다음 제어 타임스텝까지 최대 풍량으로 공기청정 시스템 가동. Filtration mode(Maximum flow rate)+Ventilation mode(Minimum flow rate)

이상과 같은 프로세스를 알고리즘으로 표현하면 Fig. 5.14와 같다.

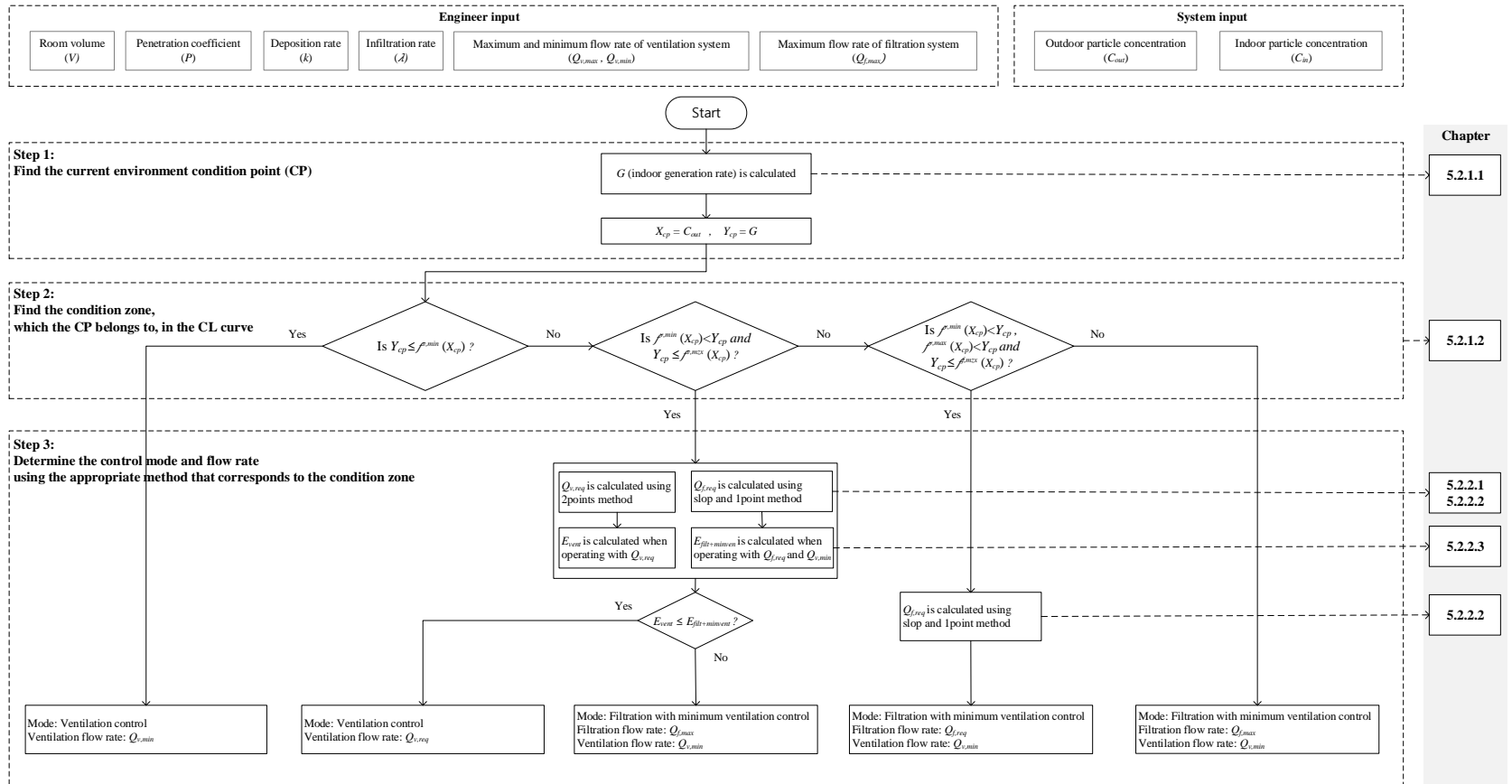


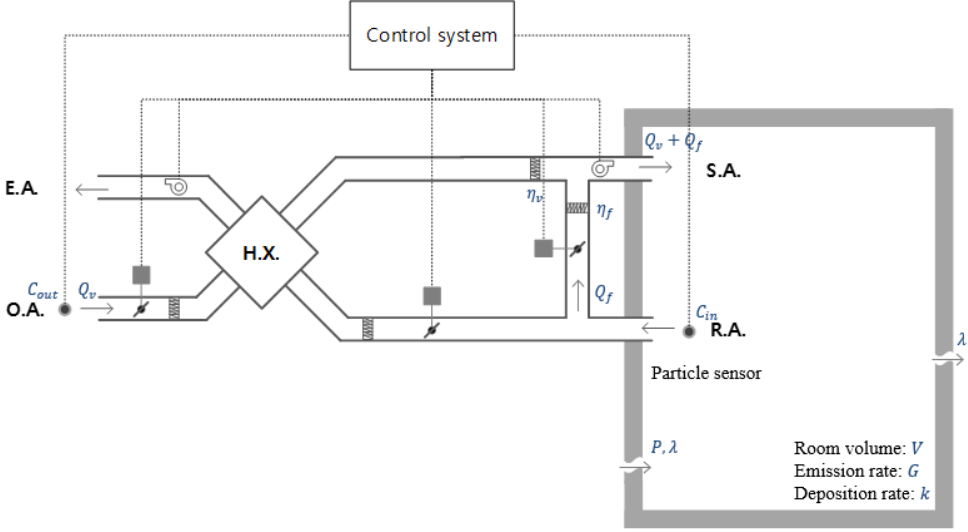
Fig. 5.14 Ventilation and filtration control process for managing indoor particle concentration

5.3.2 Ventilation과 Filtration 제어의 적용

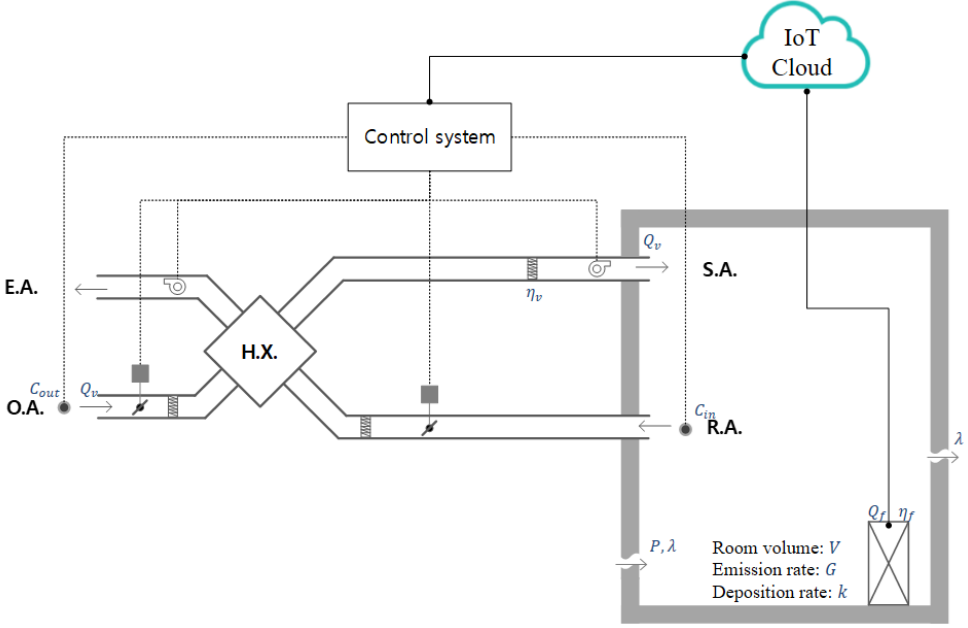
앞서 도출된 환경조건에 따른 Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘을 적용하기 위해서 요구되는 시스템 구성과 적용 절차는 다음과 같다.

5.3.2.1 Ventilation과 Filtration 제어의 적용을 위한 시스템 구성

본 연구에서 제안한 제어를 적용하기 위해 요구되는 시스템 성능 및 구성을 살펴보면, Ventilation 시스템의 경우, 미세먼지 제거효율 중성능(0.5~0.7)에 해당하는 필터가 적용된 전열교환 기계환기시스템 그리고 Filtration 시스템의 경우, 미세먼지 제거효율 고성능(0.95이상)에 해당하는 필터가 적용된 공기청정시스템이 설치되었을 때, 제어를 효과적으로 적용할 수 있다. 제어가 구현되기 위해서는 전열교환 환기 시스템과 공기청정 시스템이 서로 연동되어 제어 및 운전될 수 있어야 하며, Fig.5.15 (a)와 같이 물리적으로 하나의 시스템으로 결합된 방식 또는 Fig 5.15 (b)와 같이 각각의 분리된 별도의 시스템이 사물 인터넷 등으로 연결되어 운영되는 방식 모두 적용 가능하다.



(a) Ventilation system integrated with the filtration system



(b) Ventilation system and potable filtration system

Fig. 5.15 System set-up for condition zone control

5.3.2.2 Ventilation과 Filtration 제어의 적용 절차

본 연구의 제어는 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 실내 미세먼지 농도를 목표 농도 이하로 유지하면서 기타 실내 발생 오염물질 및 에너지를 함께 고려하여 최적의 제어량을 결정하는 것이 핵심이다.

여기서 실외와 실내 미세먼지 환경조건은 각각 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생율을 의미한다. 전자는 연속적으로 변하기 때문에 실시간으로 측정이 필요하며 후자는 직접적인 측정이 어려우므로 예측하는 과정이 필요하다. 실내 미세먼지 발생율을 예측하기 위해서는 실내외 미세먼지 농도의 실시간 측정값과 전 타임에 운전된 시스템 제어량과 함께 제어가 적용될 공간 및 시스템의 특성값이 필요하다.

따라서, 제어를 위해서는 제어가 적용될 공간 및 시스템의 특성값을 파악하는 단계(Set-up stage)와 매 타임스텝 측정값과 제어량을 입력받아 최적의 제어량을 결정하는 단계(Control stage)를 거쳐야 한다. 먼저 Set-up 단계는 최초 시스템 설치 후, 한번 진행되는 프로세스이며, 제어에 필요한 상수 입력값(알고리즘의 Engineer input에 해당)을 획득하기 위한 단계이다. Control 단계는 매 제어스텝 마다 진행되는 프로세스이다. 제어 적용을 위해 Set-up 단계와 Control 단계에서 진행되는 과정을 정리하면 다음과 같다.

(1) Set-up 단계

(i) 실 부피 파악

- 제어 대상 공간의 실 부피 파악

(ii) 침착계수 파악 (본문 3.3.1.1 참조)

- 실내 미세먼지 발생원이 없는 조건에서 실내외 미세먼지 농도를 측정하여 Fig. 3.5와 같이 커브피팅한 후, 추세선의 기울기(감쇄율)를 통해 침착계수 추정

(iii) 침투계수 파악 (본문 3.3.1.1 참조)

- 실내 미세먼지 발생원이 없는 조건에서 실내외 미세먼지 농도가 정상상태에 도달했을 때의 실내외 미세먼지 농도, 앞서 구한 침착계수, 침기율을 바탕으로 식 (3.3)에 의해 계산

(iv) 필터의 미세먼지 제거효율 파악 (본문 3.3.1.2 참조)

- 제조업자가 제공하는 데이터를 활용하거나 전단과 후단의 미세먼지 농도를 측정하여 계산

(v) 시스템 운전 풍량 파악

- 제조업자가 제공하는 데이터를 활용하거나 현장에서 직접 측정

(vi) 목표 실내 미세먼지 농도 설정

- 실내에서 유지하고자 하는 목표 농도 결정

(2) Control 단계

(i) 실내외 미세먼지 농도 측정

- 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 농도를 실시간 측정

(ii) 실내 미세먼지 발생을 예측 (본문 5.2.1.1 참조)

- Set-up 단계에서 구한 실부피, 침착계수, 침투계수, 필터효율 등의 공간 및 시스템 특성값과 실내외 미세먼지 측정값, 전타임에 운전된 시스템 제어량을 바탕으로 식 (3.14)에 의해 계산

(iii) 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 Condition zone 결정

(본문 5.2.1.2 참조)

- 해당 제어 스텝의 CL커브 상에서 실내외 미세먼지 조건(실외 농도, 실내 미세먼지 발생율)에 따라 Condition zone 결정

(iv) Condition zone에 따라 제어량 결정 (본문 5.2.2 참조)

- 해당 Condition zone에 적용될 수 있는 제어모드 및 제어량 결정 방법에 따라 Ventilation 및 Filtration 제어량 결정

이상과 같은 내용을 제어 적용 절차로 나타내면 Fig. 5.16과 같다. 이 중 Control 단계에서 제어 타임 스텝이 진행됨에 따라 해당 타임 스텝의 각 프로세스 상에서 측정 데이터, 예측 데이터, 결정 데이터의 흐름을 나타내면 Fig 5.17과 같다.

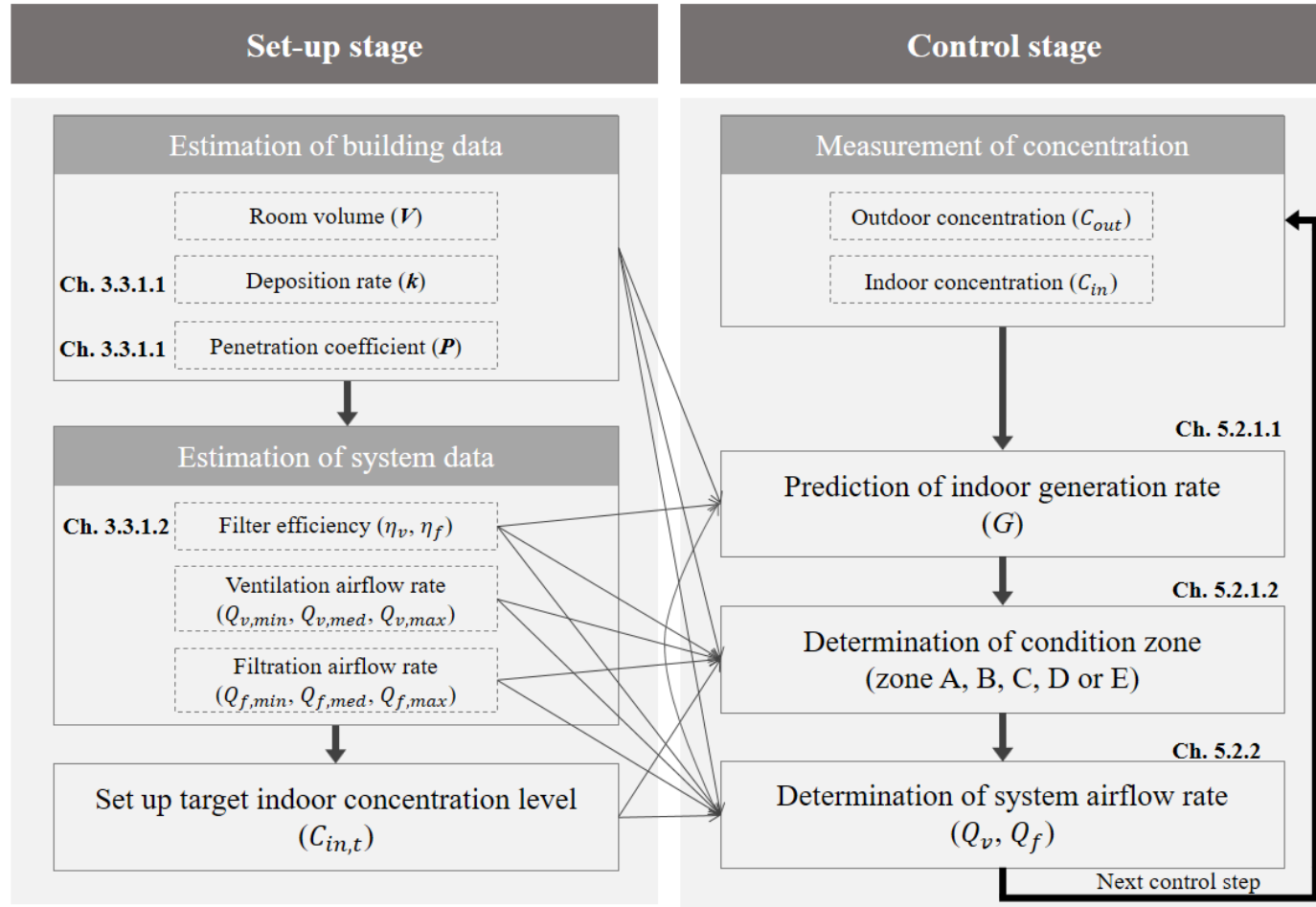


Fig. 5.16 Application process of control strategies

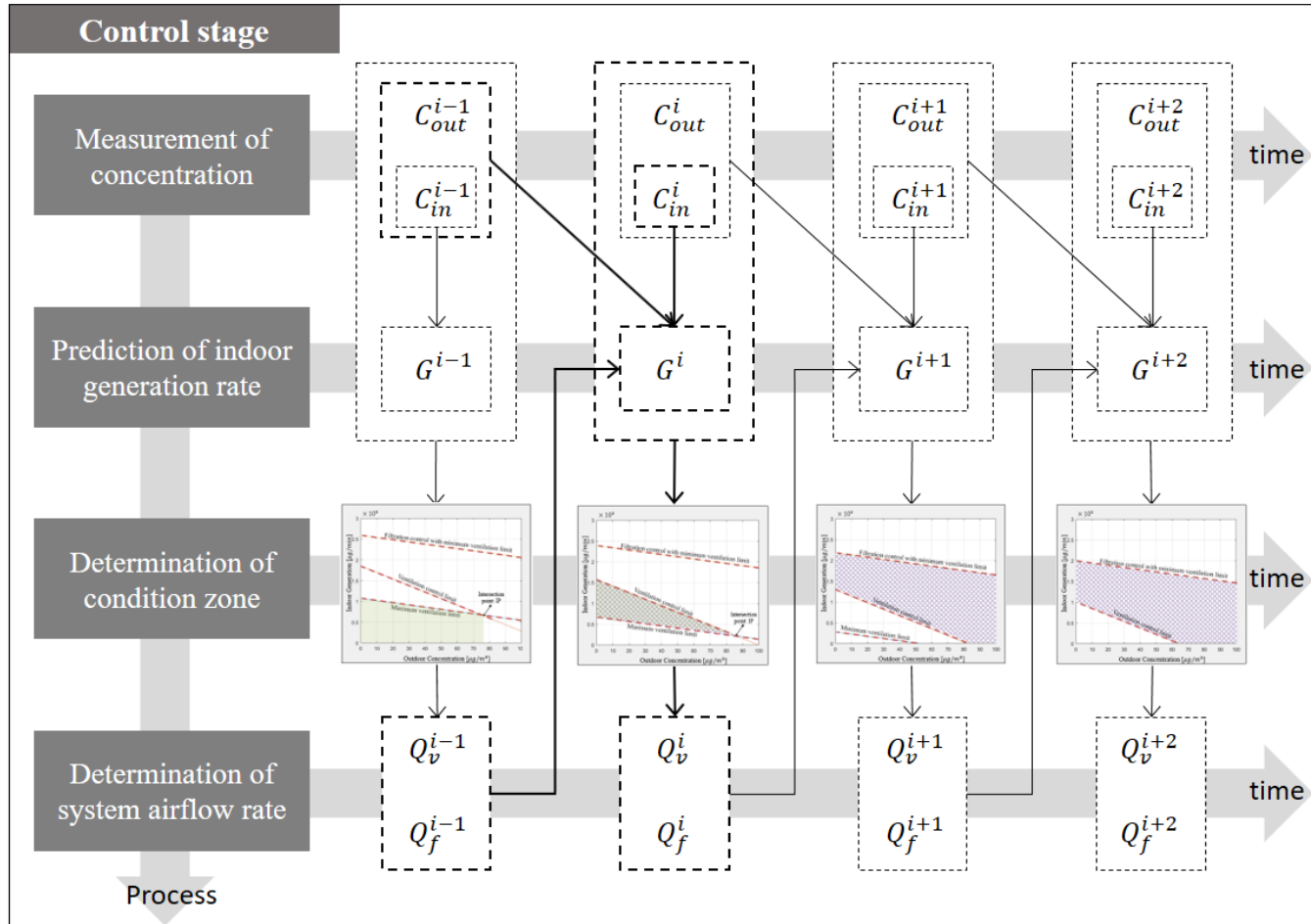


Fig. 5.17 Data flow of control stage

5.4 소결

본 장에서는 환경조건에 따른 실내 미세먼지 제어의 도출 방향을 설정하였으며, 4장에서 고찰된 환경조건 및 제어관련 인자에 따른 실내농도 변화 양상 그래프를 통해 CL 커브를 도출하고, 이를 활용한 제어 개념을 제시하였다. 또한, CL 커브의 Condition zone에 따라 제어모드와 제어량을 결정하는 세부 방법을 구체화하고 알고리즘을 수립하였다. 본 장의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 환경조건에 따라 실내 미세먼지 제어 개념을 설정하였다. 환경 조건은 침투<<발생 조건, 침투>>발생 조건, 침투≈발생 모두 큰 조건, 침투≈발생 모두 작은 조건이다. 조건에 따라 환기 유불리를 판단하여 제어모드와 제어량을 결정하는 개념을 제시하였다 (Fig 5.6).
- (2) 4장의 환경조건 및 제어관련 인자에 따른 실내농도 변화 양상 그래프를 통해 CL(Control limit) 커브를 도출하는 방법과 CL 커브를 활용한 제어 개념을 제시하였다. CL 커브는 Ventilation과 Filtration 제어 한계선(Control limit)과 제어 한계선으로 구분되는 Condition zone의 정보를 포함하고 있다. CL 커브의 Condition zone으로 제어 개념의 적용이 가능한 환경조건을 구체화 할 수 있었다. 침투<<발생 조건은 Condition C, 침투>>발생 조건은 Condition B, 침투≈발생 모두 큰 조건은 Condition D, 침투≈발생 모두 작은

조건은 Condition A에 각각 해당한다(Fig 5.10).

- (3) CL 커브를 활용하여 Ventilation과 Filtration 제어모드와 제어량을 결정할 수 있는 절차와 방법을 제시하였다. 우선, 환경조건에 해당하는 CP(Condition point)점을 찾고(Step 1), CP점이 속하는 Condition zone을 파악(Step 2)한다. 마지막으로 Condition zone 별로 제안된 방법을 적용하여 제어모드와 제어량을 결정(Step 3)한다. Step 1~3를 거쳐 제시된 Condition zone별 제어모드와 제어량은 다음과 같으며, 이를 프로세스화 하였다(Fig 5.15).
- (4) 환경조건에 따른 Ventilation과 Filtration 제어 알고리즘을 적용하기 위해서 요구되는 시스템 구성과 적용 절차를 제시하였다. 시스템 구성은 중성능 필터가 적용된 전열 교환 환기 시스템과 고성능 필터가 적용된 공기 청정 시스템이 서로 연동되어 제어될 수 있어야 한다. 적용 절차는 공간 및 시스템의 특성값을 파악하는 Set-up stage가 필요하며 이 단계는 최초 시스템 설치 후 한번 진행되는 절차이다. Control stage는 매 타임스텝 진행되는 과정으로 측정값과 제어량을 입력받아 최적의 제어량을 결정하는 단계이다(Fig 5.16).

제 6 장

시뮬레이션을 통한 제어 전략 적용효과 평가

- 6.1 평가 개요
 - 6.2 평가 케이스
 - 6.3 평가 결과
 - 6.4 소 결
-

본 장에서는 연구에서 제안한 환경조건에 따른 Ventilation과 Filtration 통합 제어 전략의 적용효과를 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 제어의 적용 효과를 어떤 항목으로 평가할 것인지 평가 요소를 설정하였다. 실험을 대체하기 위하여 앞서 개발한 농도 예측 모델에 실제 현상과 제어를 모사하기 위한 모델을 추가 작성하고, 3장의 현장실험 결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 환경조건과 시스템 및 제어 방식에 따라 평가 케이스를 설정하였다. 마지막으로 케이스별로 앞서 설정한 평가 요소 항목을 비교 분석하여 본 연구에서 제안한 제어의 적용 효과를 평가하였다.

6.1 평가 개요

6.1.1 평가 요소

제어의 적용 효과 평가는 제어의 절대적인 목표치 달성 여부와 기존 제어 방식과의 상대적인 비교를 통해 성능의 우위를 판단할 수 있다. 본 연구에서 제안한 제어의 목표는 첫째, 실내 미세먼지 농도를 목표 농도 이하로 유지, 둘째, 기타 실내 발생 오염물질 농도 관리를 위해 실에서 요구하는 최소 환기량 확보, 셋째, 첫번째와 두번째 목표를 만족시키면서, 에너지 소비량을 최소화 하는 것이다.

따라서 제어의 절대적인 목표치인 실내 미세먼지 농도의 목표 농도 이하 유지를 절대적 평가요소로 정하고, 제어 방식에 따라 실내 미세먼지 농도, 실내 CO₂ 농도, 그리고 Ventilation과 Filtration 운전에 따른 팬 파워 소비량의 상대적인 비교분석을 통해 제어의 적용에 따른 실내 미세먼지 농도, 기타 실내 발생 오염물질 농도 관리, 그리고 에너지 절감 효과를 평가하였다. 이상의 제어 적용 효과 평가요소를 정리하면 Table 6.1과 같다.

Table 6.1 Evaluation parameters

Evaluation parameters	Evaluation method
Indoor particle concentration	Absolute
	Relative
Indoor CO ₂ concentration	Relative
Fan energy	

실내 미세먼지 농도는 실내외 미세먼지 환경조건과 제어에 따라 변화하는 실내 농도를 예측할 수 있는 시뮬레이션을 작성하여 계산하였고, 실내 CO₂ 농도와 팬동력은 최적화 시뮬레이션을 통해 결정된 환기와 공기청정기 제어량 ($Q_{v,req}$, $Q_{f,req}$)을 입력받아 실내 CO₂ 농도는 식 (6.1) ~ (6.3)에 의해, 팬동력 및 팬에너지는 식 (6.4) ~ (6.9)에 의해 계산하였다.

$$\frac{dC_{in,CO_2}(t)}{dt} = \left(\frac{Q_{v,req}(t)}{V} + \lambda \right) C_{out,CO_2}(t) + 3.6 \cdot 10^6 \cdot N(t) \frac{G_p}{V} - \left(\frac{Q_{v,req}(t)}{V} + \lambda \right) C_{in,CO_2}(t) \quad (6.1)$$

$$G_p = RQ \times \frac{0.00276}{0.23RQ + 0.77} A_D M \quad (6.2)$$

$$A_D = 0.203H^{0.725}W^{0.425} \quad (6.3)$$

여기서,

C_{in,CO_2}	: Indoor CO ₂ concentration [ppm]
C_{out,CO_2}	: Outdoor CO ₂ concentration [ppm]
G_p	: Metabolic CO ₂ generation rate per person [l/s]
$Q_{v,req}$: Ventilation flow rate [m^3/h]
λ	: Infiltration rate [h^{-1}]
V	: Room volume [m^3]
RQ	: Respiratory quotient, i.e. the relative volumetric rates of CO ₂ produced to O ₂ consumed. An $RQ = 0.83$ applies to a normal diet mix of fat, carbohydrate and protein
A_D	: Dubois surface area [m^2]
M	: Level of physical activity, or the metabolic rate per unit surface area (in met; 1 met = 58.2 W/ m^2) [met]
H	: Body height [m]
W	: Body weight [kg]

$$W_v = \frac{Q_{v,req} \times \Delta P_v}{3,600 \times F_{v,eff}} \quad (6.4)$$

$$E_v = W_v \times T_v \quad (6.5)$$

$$W_f = \frac{Q_{f,req} \times \Delta P_f}{3,600 \times F_{f,eff}} \quad (6.6)$$

$$E_f = W_f \times T_f \quad (6.7)$$

$$W_{tot} = W_v + W_f \quad (6.8)$$

$$E_{tot} = E_v + E_f \quad (6.9)$$

여기서,

W_{tot}	: Total fan power [W]
W_v	: Fan power of ventilation system [W]
W_f	: Fan power of filtration system [W]
$Q_{v,req}$: Required ventilation flow rate [m^3/h]
$Q_{f,req}$: Required filtration flow rate [m^3/h]
ΔP_v	: Pressure drop of ventilation system [Pa]
ΔP_f	: Pressure drop of filtration system [Pa]
$F_{v,eff}$: Ventilation fan efficiency [-]
$F_{f,eff}$: Filtration fan efficiency [-]
E_{tot}	: Total fan energy [Wh]
E_v	: Fan energy of ventilation system [Wh]
E_f	: Fan energy of filtration system [Wh]
T_v	: Ventilation fan operating time [h]
T_f	: Filtration fan operating time [h]

6.1.2 평가 모델

본 절에서는 제어 알고리즘의 적용 효과를 평가하기 위한 시뮬레이션 모델을 구축하고 모델 예측값과 실험 값을 비교하여 검증하였다.

6.1.2.1 평가 대상 공간 및 시스템 조건

제어 알고리즘 적용 평가를 위해 Fig. 6.1과 같은 가상의 공간과 시스템으로 구성된 공간을 시뮬레이션 대상으로 하였다. 평가 대상 공간의 크기 및 침투계수, 침착율, 평균 침기율 등은 3장에서 현장 실험을 진행한 공동주택과 동일하다고 가정하였다. Ventilation과 Filtration 제어를 위한 시스템 구성은 공동주택에 설치되는 일반적인 전열교환 환기장치에 Fig. 6.1에서와 같이 Filtration이 통합된 시스템이 적용되었다고 가정하였다.

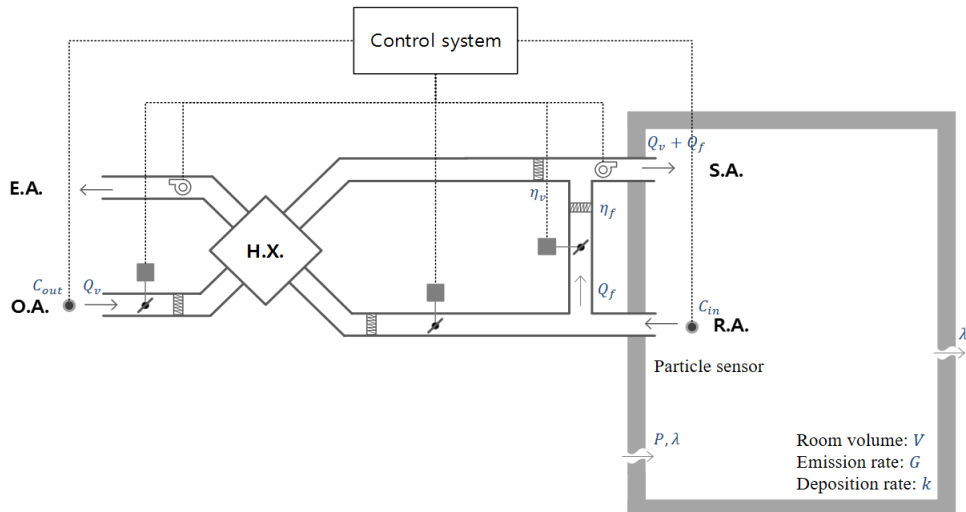


Fig. 6.1 Schematic diagram of indoor space equipped with the ventilation and filtration system and model parameters

Ventilation 시스템의 경우, 해당 규모의 공동주택에 일반적으로 적용되는 100, 150, 200 m^3/h 의 3단으로 풍량 조절이 가능하고, 미세먼지 제거효율이 0.65인 중성능 필터가 적용되었다고 가정하였다. Filtration 시스템의 경우, 200, 400, 600 m^3/h 의 3단으로 풍량 조절이 가능하고, 미세먼지 제거효율이 0.95인 고성능 필터가 적용되었다고 가정하였다. 시뮬레이션 모델에 활용된 공간 및 Ventilation과 Filtration 관련 파라미터의 값은 Table 6.2 그리고 6.3과 같다.

Table 6.2 Parameters related to space

Parameters	Value	Unit
Room volume	200	m^3
Penetration coefficient	0.7	-
Deposition rate	0.4	h^{-1}
Infiltration rate	0.06	h^{-1}

Table 6.3 Parameters related to system

Ventilation			Filtration		
Flow rate	Filter efficiency	Filter Pressure drop	Flow rate	Filter efficiency	Filter Pressure drop
$[m^3/h]$	$[-]$	$[Pa]$	$[m^3/h]$	$[-]$	$[Pa]$
100 (Step 1)			200 (Step 1)		
150 (Step 2)	0.65	120	400 (Step 2)	0.95	200
200 (Step 3)			600 (Step 3)		

6.1.2.2 모델 구축 및 검증

본 연구에서 제안한 제어를 Fig. 6.1과 같은 공간과 시스템에 적용 시키기 위해서는 매 타임 스텝 측정된 실내외 미세먼지 농도와 시스템 제어량을 피드백 받아 실내 발생율을 예측하고, 이를 바탕으로 제어를 결정하여야 한다. 실제 시스템에서는 이러한 과정을 Control system에서 처리하게 된다. Control system은 크게 Dynamic model을 통해 매 타임 스텝 실내 미세먼지 발생율을 예측하는 파트와 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 기타 실내 발생 오염물질과 팬동력을 고려하여 제어를 최적화하는 Multi-objective optimization 파트로 구성된다.

Dynamic model 파트에서는 매 타임 스텝 실내 미세먼지 발생율을 출력한다. 이를 위하여 부피, 침투계수, 침착율, Ventilation 필터효율, Filtration 필터효율 값 등의 상수 값(Constant inputs)과 함께 센서를 통해 측정된 실내외 농도 값, 전 타임 스텝에서 운전된 Ventilation과 Filtration 제어 풍량 등의 변수 값(Variable inputs)의 입력값이 필요하다.

Multi-objective optimization 파트에서는 매 타임 스텝 운전 해야할 Ventilation과 Filtration 제어 풍량을 출력한다. 이를 위하여 실내 미세먼지 목표 농도, 실에서 요구하는 최소 환기량, Ventilation 시스템 최대 풍량, Filtration 시스템 최대 풍량 등의 상수 값(Constant inputs)과 함께 센서를 통해 측정된 실내외 농도 값, Dynamic model 파트에서 출력한 실내 발생율 값 등의 변수 값(Variable inputs)을 입력값으로 필요로 한다.

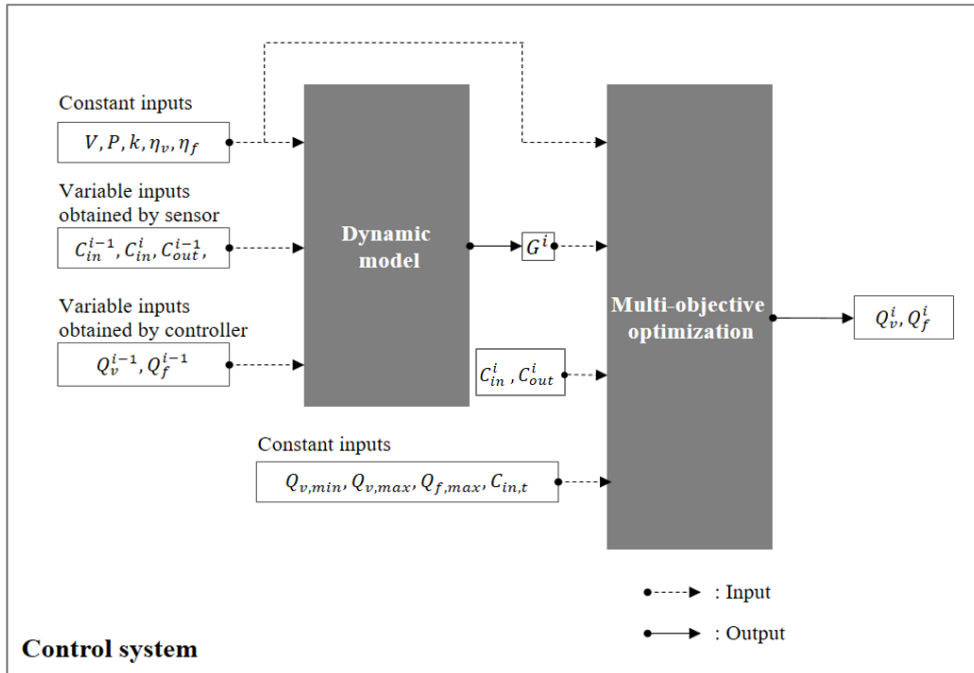


Fig. 6.2 Concept of data flow

이상과 같은 Control system에서의 입력값과 출력값의 흐름을 개념적으로 나타내면 Fig. 6.2와 같이 나타낼 수 있다.

시뮬레이션 모델의 검증은 위해 3장의 현장 실험을 통해 획득한 실내 미세먼지 농도 측정값과 모델을 통해 예측한 실내 미세먼지 농도 값을 비교하였다. 현장 실험에서 중간 풍량(Step 2)으로 Ventilation 제어를 실시하였을 경우 또는 Filtration 제어를 실시 하였을 때 측정된 실내 미세먼지 농도 값과 모델 예측치를 각각 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 6.3 및 6.4와 같다. 측정 값과 모델 예측 값이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나 모델이 실체를 잘 모사하고 있다고 할 수 있다.

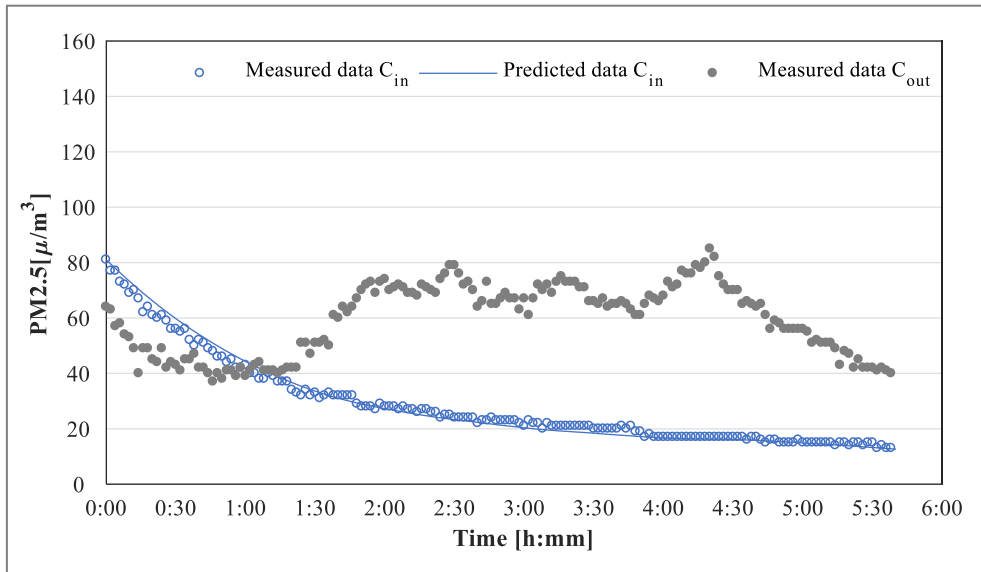


Fig. 6.3 Comparison between measured data and predicted data during ventilation control

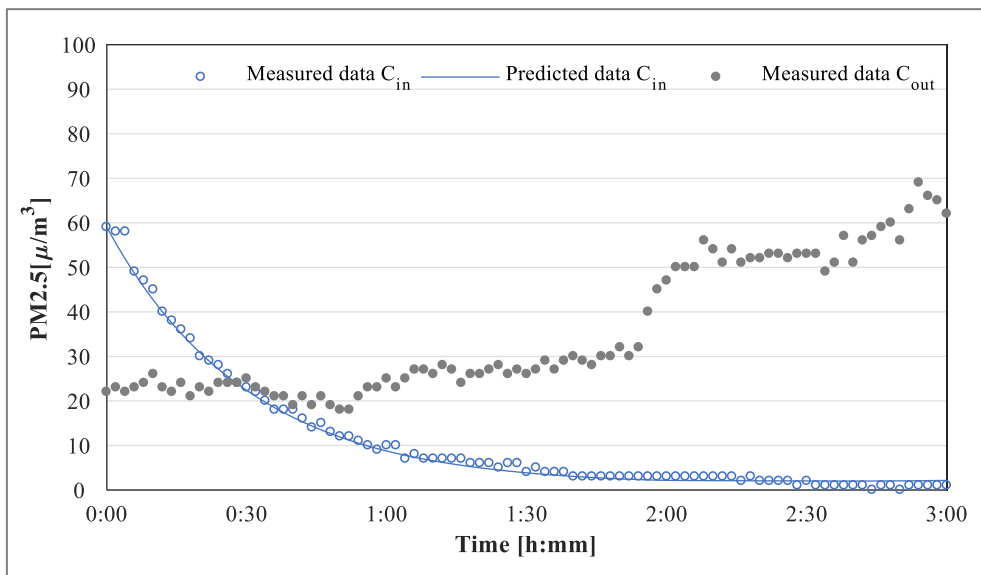


Fig. 6.4 Comparison between measured data and predicted data during filtration control

6.2 평가 케이스

본 절에서는 앞서 작성된 시뮬레이션을 활용하여 제어 적용효과를 평가하기 위한 케이스를 설정하였다. 제어의 효과는 제어방식 뿐만 아니라 실내외 환경조건에 따라서 달라질 수 있다. 따라서 제어의 적용효과를 평가하기 위한 케이스 구성에 실내외 환경조건과 시스템 제어방식을 고려하였다.

6.2.1 환경조건 케이스

4장과 5장에 걸쳐 언급된 바와 같이 Ventilation 제어와 Filtration 제어의 실내 미세먼지 제어 효과는 실내외 미세먼지 환경조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 환경조건에 따른 제어 효과를 평가할 수 있도록 다양한 환경조건이 케이스에 포함되도록 구성하였다.

실외 미세먼지 환경 조건인 실외 미세먼지 농도의 경우, Airkorea 에서 확정데이터로 제공하는 지역별 1시간 평균 농도 측정값을 활용하여 케이스를 구성하였다. Fig. 6.5와 같이 하루에 걸쳐 실외 미세먼지 농도가 전체적으로 낮은 경우(Case E1), 전체적으로 높은 경우(Case E2), 낮은 농도와 높은 농도가 모두 있는 경우 (Case E3)를 실외 미세먼지 환경 조건 케이스로 정하였다.

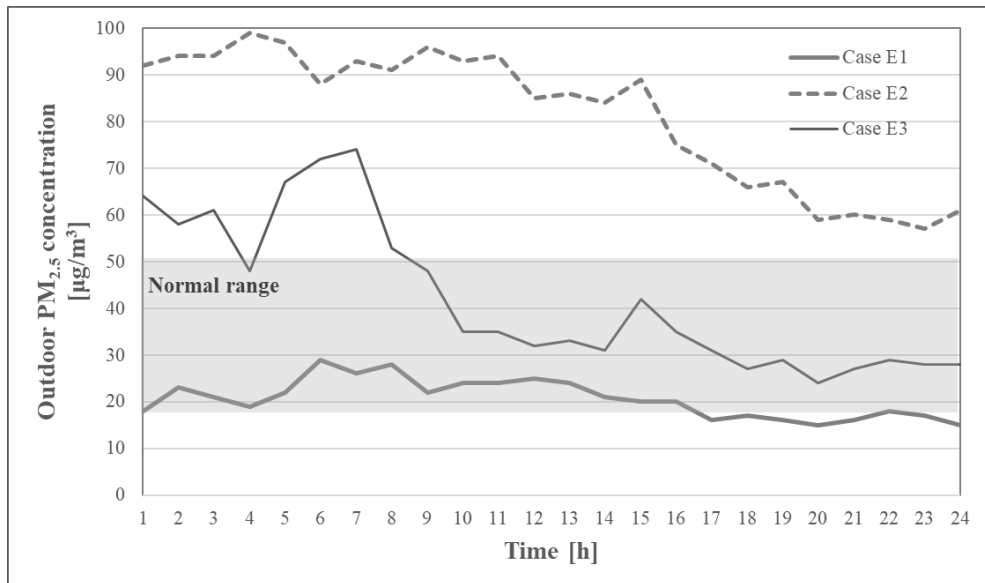


Fig. 6.5 Outdoor condition cases

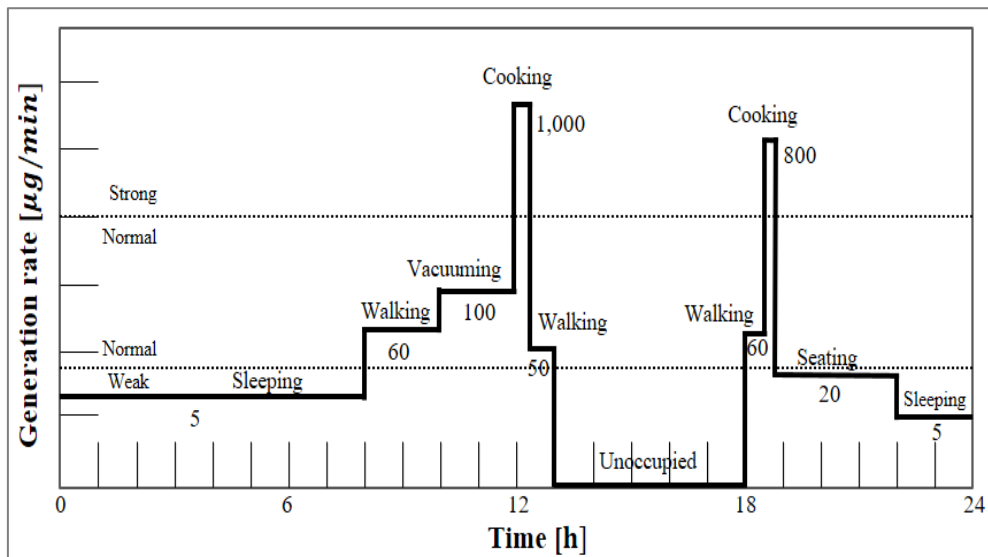


Fig. 6.6 Indoor condition case

실내 미세먼지 환경 조건인 실내 미세먼지 발생율의 경우, 거주 공간의 다양한 거주 활동(거주자의 움직임, 청소, 조리 활동, 수면 등)에 의해 발생 가능한 발생율의 범위(Table 4.3 참조)를 참고하여 Fig. 6.6과 같은 발생율 스케줄을 갖는 실내 미세먼지 환경조건 케이스를 설정하였다. 거주자가 모두 퇴실하여 발생원이 없는 조건부터 Sleeping과 Seating과 같이 발생율 강도가 Weak인 조건, Walking과 Vacuuming과 같이 발생율 강도가 Normal인 조건, Cooking과 같이 발생율 강도가 Strong인 조건을 포함시켜 실내 미세먼지 환경조건 범위가 Weak ~ Strong까지 분포할 수 있도록 케이스를 구성하였다.

6.2.2 시스템 및 제어 케이스

본 연구에서 제시된 제어 방식의 적용효과를 기존 방식과 비교하기 위하여 시스템 및 제어 케이스를 구성하였다. 우선 Fig. 6.7에서 보듯이 기존 시스템에 기존 제어 방식을 적용한 케이스 (Case S1-C1)와 Fig. 6.8과 같이 기존 시스템에 본 연구의 제어 방식(이하 Condition zone 제어)을 적용한 케이스 (Case S1-C2)를 구성하여 동일한 시스템에 제어 방식에 따른 성능을 비교하고자 하였다. 또한, Fig. 6.9에서와 같이 고성능 필터를 통해 환기 가능한 바이패스 유로가 설치된 시스템에 Condition zone 제어를 적용한 케이스 (Case S2-C2)를 포함시켜 개선된 시스템에서의 제어 적용 효과를 함께 평가하고자 하였다. 고성능 필터를 선택하는 바이패스는 환기가 불리한 조건에서 작동할 수 있도록 CL 커브의 Condition zone을 Fig.

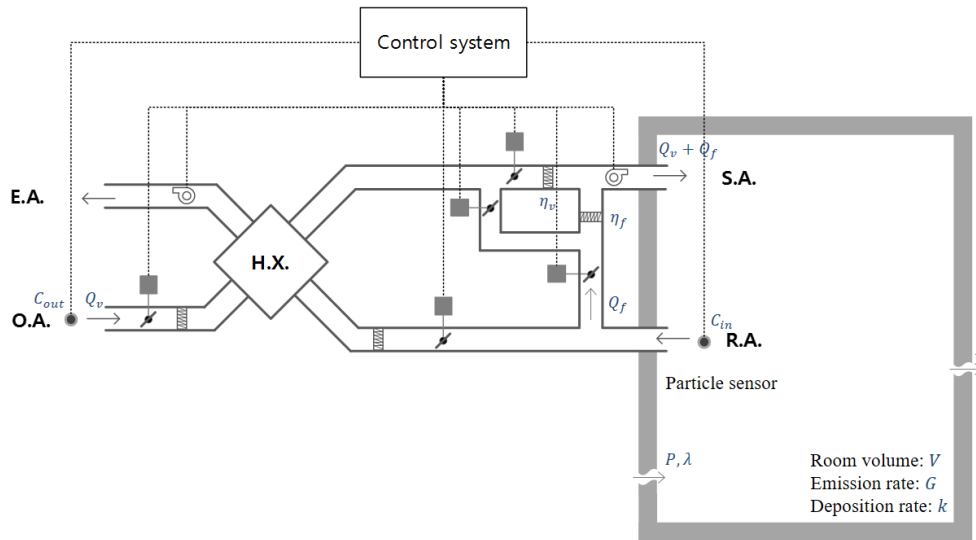


Fig. 6.9 Schematic system and control diagram of Case S2-C2

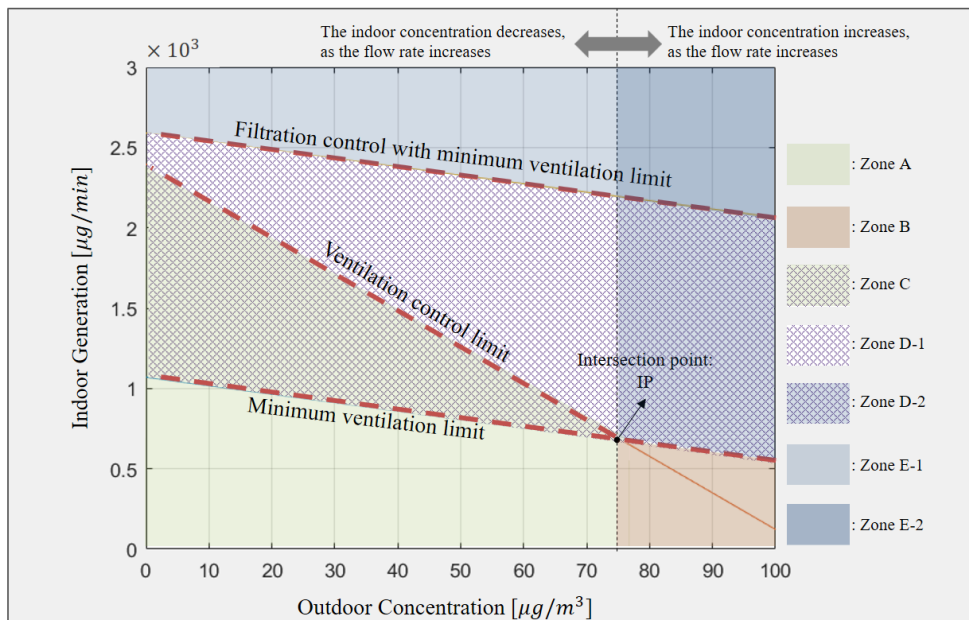


Fig. 6.10 Modified CL curve and condition zones for Case S2-C2

이상과 같은 실내외 환경조건 및 시스템 구성과 제어방식에 따라 구성된 시뮬레이션 케이스는 총 9개로, Table 6.4와 같다.

Table 6.4 Simulation cases for evaluating the effect of control application

Level of outdoor concentration	System configuration & Control method type	Cases
E1: Good ~ Normal	S1-C1	E1-S1-C1
	S1-C2	E1-S1-C2
	S2-C2	E1-S2-C2
E2: Bad	S1-C1	E2-S1-C1
	S1-C2	E2-S1-C2
	S2-C2	E2-S2-C2
E3: Normal ~ Bad	S1-C1	E3-S1-C1
	S1-C2	E3-S1-C2
	S2-C2	E3-S2-C2

6.3 평가 결과

6.3.1 환경조건 E1에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교

환경조건 E1은 실외 미세먼지 농도가 $10\sim30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위의 수준으로 비교적 낮은 농도를 보이고, 실내 미세먼지 발생율은 $5\sim1,000\ \mu\text{g}/\text{min}$ 범위의 낮은 발생율부터 높은 발생율까지 거주자의 생활패턴에 의해 시간에 따라 다양하게 분포되어 있는 조건이다. (Fig. 6.11의 (a) 참조) E1 환경조건은 크게 구분하면 실외 농도도 낮고, 실내 발생율도 낮은 조건(파란색 사각형 부분)과 실외 농도는 낮고, 실내 발생율은 높은 조건(붉은색 사각형 부분)으로 구분된다. 이와 같은 환경조건에 따라 Condition zone은 Fig. 6.11의 (b)에서와 같이 Sleeping, Seating, Walking과 같이 실내 발생율이 낮은 활동 구간에서는 Zone A, Vacuuming과 같이 실내 발생율이 중간 수준인 활동 구간에서는 Zone C와 D1, Cooking과 같이 실내 발생율이 높은 활동 구간에서는 Zone E에 각각 해당된다.

기존 시스템에 기존 제어 방식이 적용된 S1-C1 케이스의 경우, 실외 미세먼지 농도가 $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 구간이 없으므로, 24시간동안 계속 Ventilation 제어를 한다. 기존 시스템에 Condition zone 제어 방식이 적용된 S1-C2 케이스의 경우, Condition zone에 따라 Ventilation과 Filtration 제어를 한다. 환경조건 E1은 실외 농도가 낮아 고성능 바이패스 유로가 작동하는 구간이 없기 때문에 S2-C2 케이스는 S1-C2 케이스와 동일하게 운전된다.

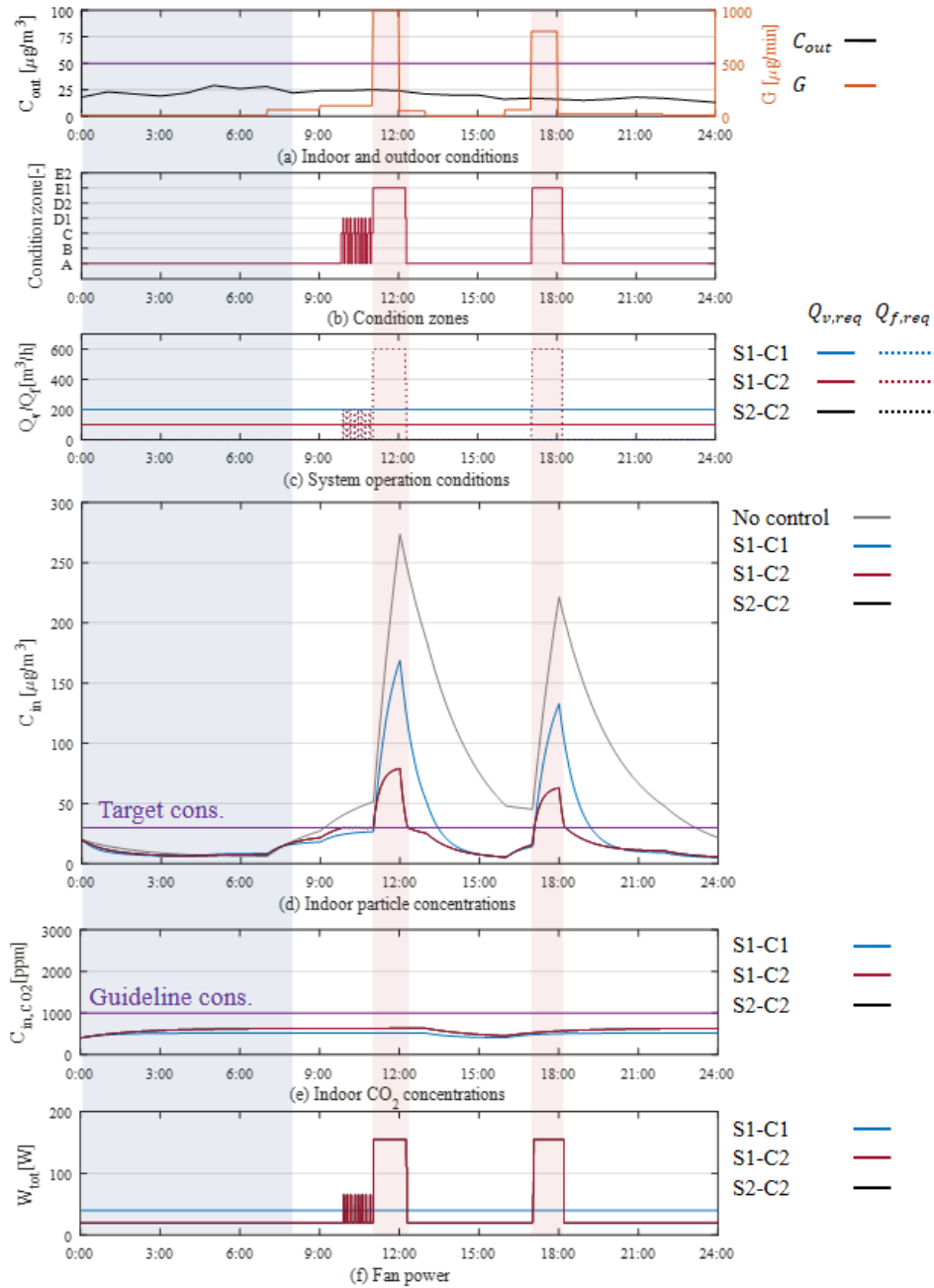


Fig. 6.11 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO₂ concentrations, and fan power during E1

환경조건 E1에서 시스템 및 제어 케이스에 따른 실내 미세먼지 농도, 실내 이산화탄소 농도, 팬동력을 비교한 결과는 Fig. 6.11의 (d) ~ (f)와 같다.

실외 농도도 낮고 실내 발생율도 낮은 파란색 구간에서의 결과를 살펴보면, 실내 미세먼지 농도는 모든 케이스에서 유사한 수준이었다. 실내 이산화탄소 농도의 경우, S1-C1 케이스에서 농도가 더 낮았으나, S1-C2(S2-C2) 케이스의 경우도 실내 기준치 이하를 유지하였다. 팬동력은 S1-C1이 S1-C2(S2-C2)보다 더 많이 소비하는 것으로 나타났다. 즉, 해당 환경조건에서 Condition 제어의 경우, 더 적은 팬동력을 소비하면서 실내 미세먼지 농도와 실내 이산화탄소 농도를 유사한 수준으로 관리할 수 있었다.

실외 농도는 낮고 실내 발생율은 높은 붉은색 구간에서의 결과를 살펴보면, 실내 미세먼지의 경우, 모든 케이스에서 목표 농도를 초과하였다. 그러나, S1-C2(S2-C2) 케이스가 S1-C1 케이스보다 실내 미세먼지 농도가 50% 수준으로 더 낮았다. 실내 이산화탄소 농도의 경우 모든 케이스에서 실내 기준치 이하를 유지하였으며, 팬동력은 S1-C2(S2-C2) 케이스가 S1-C1 케이스보다 더 많이 소비하는 것으로 나타났다. 즉, 해당 환경조건에서 Condition 제어의 경우, 팬동력을 많이 소비하지만 실내 미세먼지 농도 경감에 훨씬 유리하였다.

6.3.2 환경조건 E2에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교

환경조건 E2은 실외 미세먼지 농도는 $51\sim 100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위의 수준으로 외기 농도가 높은 환경이고, 실내 미세먼지 발생율은 E1과 동일한 조건이다. (Fig. 6.12의 (a) 참조) E2 환경조건은 크게 구분하면 실외 농도는 높고, 실내 발생율은 낮은 조건(파란색 사각형 부분)과 실외 농도도 높고, 실내 발생율도 높은 조건(붉은색 사각형 부분)으로 구분된다. 이와 같은 환경조건에 따라 Condition zone은 Fig. 6.12의 (b)에서와 같이 Sleeping, Seating, Walking과 같이 실내 발생율이 낮은 활동 구간에서는 Zone A 또는 B, Vacuuming과 같이 실내 발생율이 중간 수준인 활동 구간에서는 Zone D2, Cooking과 같이 실내 발생율이 높은 활동 구간에서는 Zone E에 각각 해당된다.

기존 시스템에 기존 제어 방식이 적용된 S1-C1 케이스의 경우, 실외 미세먼지 농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 항상 초과하기 때문에, 24시간동안 최대 풍량으로 Filtration 제어를 한다. 기존 시스템에 Condition zone 제어 방식이 적용된 S1-C2 케이스의 경우, Condition zone에 따라 Ventilation과 Filtration 제어를 한다. S2-C2 케이스의 경우, Zone B와 D2에서 고성능 바이패스 유로를 통해 환기하게 된다.

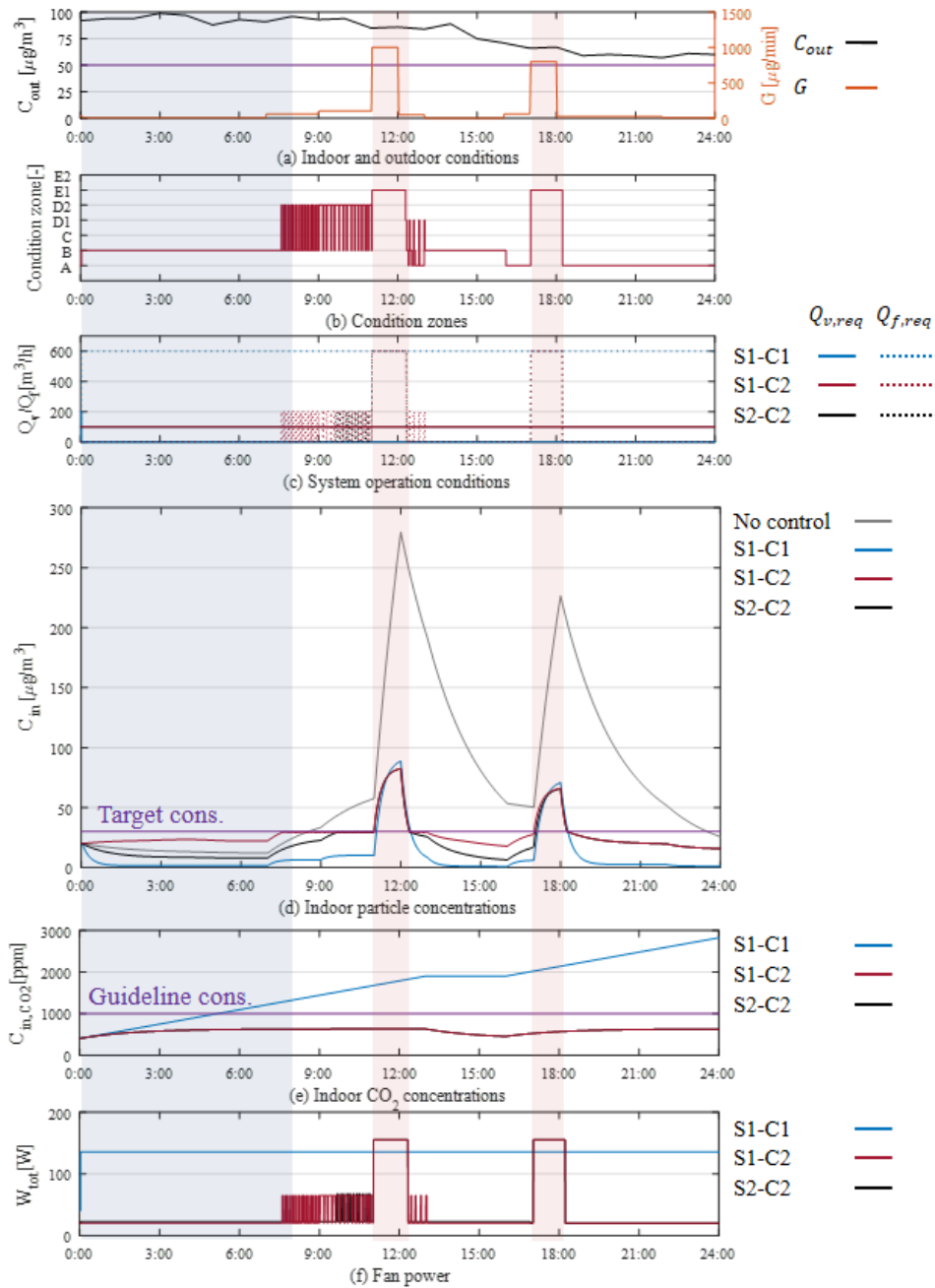


Fig. 6.12 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO₂ concentrations, and fan power during E2

환경조건 E2에서 시스템 및 제어 케이스에 따른 실내 미세먼지 농도, 실내 이산화탄소 농도, 팬동력을 비교한 결과는 Fig. 6.12의 (d) ~ (f)와 같다.

실외 농도는 높고 실내 발생율은 낮은 파란색 구간에서의 결과를 살펴보면, 실내 미세먼지 농도는 S1-C1 케이스에서 가장 낮았다. 그러나 S1-C2, S2-C2 케이스도 목표 농도 이하를 유지할 수 있었고, 고성능 바이패스가 작동되는 S2-C2 케이스가 S1-C2 케이스 보다 실내 미세먼지 농도를 더 낮출 수 있었다. 실내 이산화탄소 농도의 경우, S1-C2와 S2-C2 케이스가 기준치를 만족시키는 것에 비해 S1-C1 케이스는 실내 기준치를 초과하는 구간이 발생하였다. 팬동력은 S1-C1 케이스가 다른 케이스들보다 4배 이상 소비하는 것으로 나타났다. 즉, 해당 환경조건에서 Condition 제어의 경우, 훨씬 적은 팬동력을 소비하면서 실내 미세먼지 농도와 실내 이산화탄소 농도를 목표 농도 또는 기준치 이하로 관리할 수 있었다.

실외 농도도 높고 실내 발생율도 높은 붉은색 구간에서의 결과를 살펴보면, 실내 미세먼지 농도의 경우, 모든 케이스에서 목표 농도를 초과하였고, 유사한 수준을 보였다. 실내 이산화탄소 농도의 경우, S1-C2와 S2-C2 케이스가 기준치를 만족시키는 것에 비해 S1-C1 케이스에서는 실내 기준치를 초과하였다. 즉, 해당 환경조건에서 Condition 제어의 경우, 유사한 팬동력을 사용하고, 실내 미세먼지 농도 수준도 유사하게 유지하면서, 실내 발생 오염물질 관리에는 유리하였다.

6.3.3 환경조건 E3에 대한 시스템 및 제어 케이스 비교

환경조건 E3는 실외 미세먼지 농도가 $20\sim 80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위의 수준으로 낮은 농도부터 높은 농도까지 변화하고, 실내 미세먼지 발생율은 E1, E2와 동일한 조건이다. (Fig. 6.13의 (a) 참조) E3 환경조건은 크게 구분하면 실외 농도는 높고, 실내 발생율은 낮은 조건(파란색 사각형 부분)과 실외 농도는 낮고, 실내 발생율은 높은 조건(붉은색 사각형 부분)으로 구분된다. 이와 같은 환경조건에 따라 Condition zone은 Fig. 6.13의 (b)에서와 같이 Sleeping, Seating, Walking과 같이 실내 발생율이 낮은 활동 구간에서는 Zone A 또는 B, Vacuuming과 같이 실내 발생율이 중간 수준인 활동 구간에서는 Zone C와 D1, Cooking과 같이 실내 발생율이 높은 활동 구간에서는 Zone E에 각각 해당된다.

기존 시스템에 기존 제어 방식이 적용된 S1-C1 케이스의 경우, 실외 미세먼지 농도 조건에 따라 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하 구간에서는 Ventilation 제어를 하고, $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 구간에서는 Filtration 제어를 한다. 기존 시스템에 Condition zone 제어 방식이 적용된 S1-C2 케이스의 경우, Condition zone에 따라 Ventilation과 Filtration 제어를 한다. S2-C2 케이스의 경우, Zone B에서 고성능 바이패스 유로를 통해 환기하게 된다.

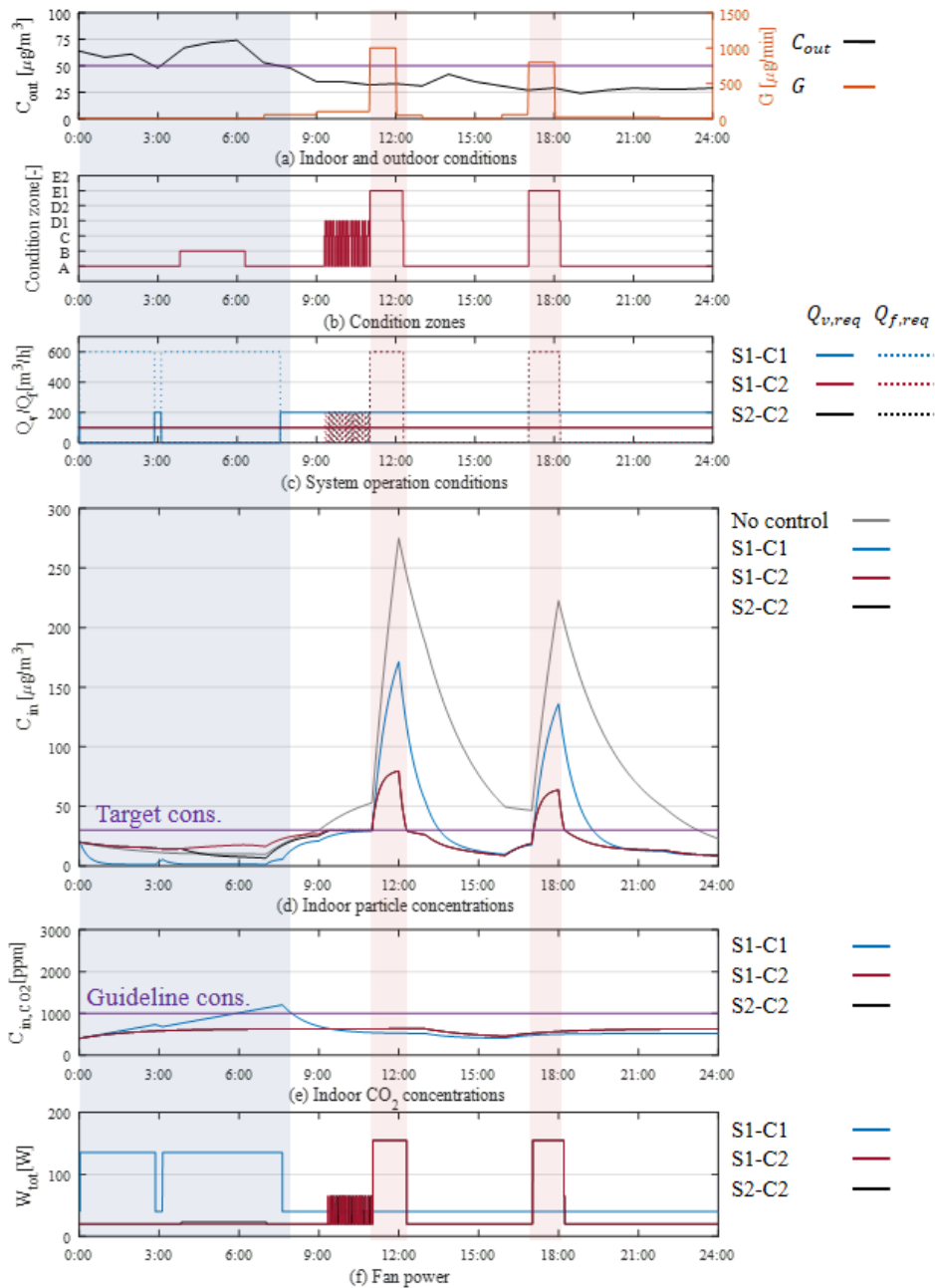


Fig. 6.13 Indoor and outdoor conditions, system operating conditions, indoor particle and CO₂ concentrations, and fan power during E3

환경조건 E3에서 시스템 및 제어 케이스에 따른 실내 미세먼지 농도, 실내 이산화탄소 농도, 팬동력을 비교한 결과는 Fig. 6.13의 (d) ~ (f)와 같다.

실외 농도는 높고, 실내 발생율은 낮은 파란색 구간에서의 실내 미세먼지 농도, 실내 이산화탄소 농도, 팬동력을 비교한 결과는 E2 케이스의 파란색 구간에서의 분석결과와 동일하였다. 실외 농도는 낮고, 실내 발생율은 높은 붉은색 구간에서의 결과는 E1 케이스의 붉은색 구간에서의 분석결과와 동일하였다.

이상의 분석결과를 토대로 Condition zone 제어의 적용효과를 4개의 환경조건별로 구분하여 정리하면 Fig. 6.14와 같이 나타낼 수 있다.

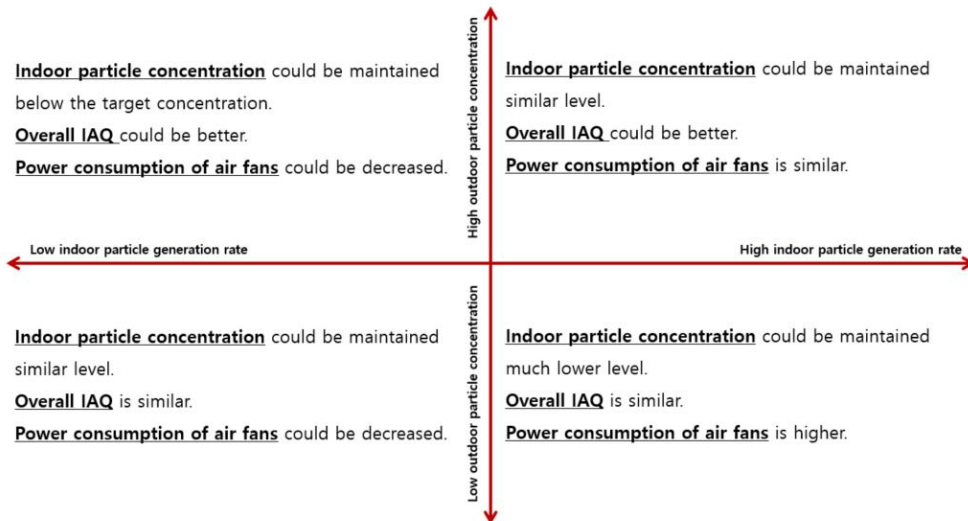


Fig. 6.14 Effects when Condition zone control is adopted under 4 different conditions

6.4 소결

본 장에서는 제어 적용 효과를 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 절대적인 목표 달성과 제어 방식 간의 상대적인 평가를 통해 적용 효과를 평가하였으며, 이를 위해 절대 평가 요소와 상대 평가 요소를 설정하였다. 실험을 대신하여 제어를 적용하고 평가할 수 있도록 시뮬레이션을 작성하고, 이를 실험값과 비교하여 검증하였다. 앞서 4장과 5장으로부터 환경조건에 따라 제어 효과가 달라 질 수 있으므로, 다양한 환경조건 케이스에 대해서 시스템 및 제어 방식 별로 평가 요소에 따라 적용 효과를 비교하였다. 본 장의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 3장에서 구축된 실내 미세먼지 농도 예측 및 실내 발생을 예측 모델을 바탕으로 제어의 적용 효과를 평가하기 위한 시뮬레이션을 작성하였다. 작성된 모델의 계산 결과가 실험의 측정치와 유사하여 시뮬레이션 모델은 실제를 잘 모사하고 있는 것으로 판단하고, 제어의 적용 평가에 활용하였다. 제어의 평가는 환경조건 케이스 별로 시스템 및 제어 방식에 따라 실내 미세먼지 목표 농도 이하 유지와 같은 절대적인 목표 달성 여부와 함께 실내 미세먼지 농도, 실내 CO₂ 농도, 팬동력 등의 상대 평가 요소를 비교하여 평가를 실시하였다.

- (2) 실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율도 높은 환경 조건(Condition D2 or E1)에서는 S1-C1(기존 시스템+기존 제어)의 경우 Filtration 제어, S1-C2(기존 시스템+ Condition zone 제어)와 S2-C2(개선된 시스템+Condition zone 제어)의 경우 minimum ventilation + Filtration 제어를 실시하게 된다. 이 때, 실내 미세먼지 농도와 팬동력은 모든 케이스에서 유사하였으나, 환기를 하지 않는 S1-C1의 경우, 실내 CO₂ 농도가 실내 기준치를 초과하였다. 이러한 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 유사한 실내 미세먼지 농도를 유지하고 비슷한 팬동력을 사용하면서 기존 제어를 적용했을 때보다 실내에서 발생하는 오염물질에 관리에 유리한 것으로 나타났다.
- (3) 실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율은 낮은 환경 조건(Condition B)에서는 S1-C1(기존 시스템+기존 제어)의 경우 Filtration 제어, S1-C2(기존 시스템+ Condition zone 제어)와 S2-C2(개선된 시스템+Condition zone 제어)의 경우 minimum ventilation 제어를 실시하게 된다. 이 때, 실내 미세먼지 농도는 S1-C2>S2-C2>S1-C1의 순으로 나타났다. 기존 제어가 Filtration 제어를 통해 실내 미세먼지 농도가 가장 낮았으나 나머지 두 제어 방식도 목표 농도 이하를 유지 할 수 있었다. 실내 CO₂ 농도의 경우, 환기를 하지 않는 S1-C1의 경우, 실내 CO₂ 농도가 실내 기준치를 초과하였다. 팬동력은 기존 제어방식이 4배 이상

많이 사용하였다. 따라서 이러한 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우 기존 제어를 적용했을 때보다 상대적인 실내 미세먼지 농도는 높으나 목표 농도 유지는 가능하며, 실내에서 발생되는 오염물질 관리에 유리하고 훨씬 작은 팬동력을 사용하는 것으로 나타났다.

- (4) 실외 미세먼지 농도가 낮고, 실내 미세먼지 발생율은 높은 환경 조건(Condition C, D1, or E1)에서는 S1-C1(기존 시스템+기존 제어)의 경우 Ventilation 제어, S1-C2(기존 시스템+Condition zone 제어)와 S2-C2(개선된 시스템+Condition zone 제어)의 경우 minimum ventilation + Filtration 제어를 실시하게 된다. 이 때, 팬동력은 S1-C1 케이스가 작지만 실내에서 발생된 미세먼지에 의한 실내 미세먼지 농도가 기준을 훨씬 상회($\approx 160\mu\text{g}/\text{m}^3$)하게 된다. S1-C2(or S2-C2) 방식의 경우, Filtration 제어를 통해 실내 미세먼지 농도를 S1-C1의 경우보다 절반 이상 경감시킬 수 있었다. 그러나 S1-C2(or S2-C2) 케이스의 경우도 실내 미세먼지 목표 농도($30\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하여 목표 농도 달성을 위해서는 Filtration 풍량을 높여야 할 것으로 판단된다. 실내 CO_2 농도는 환기량이 적은 S1-C2(or S2-C2) 케이스에서 더 높았으나 모든 케이스에서 실내 기준을 만족시켰다. 따라서 이러한 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 팬동력은 상대적으로 많이 사용하지만 실내 미세먼지 농도 경감을 위해서 기존 제어방식보다 유리한 것

으로 나타났다.

- (5) 실외 미세먼지 농도가 낮고, 실내 미세먼지 발생율도 낮은 환경 조건(Condition A)에서는 S1-C1(기존 시스템+기존 제어)의 경우 Ventilation 제어, S1-C2(기존 시스템+ Condition zone 제어)와 S2-C2(개선된 시스템+Condition zone 제어)의 경우 minimum ventilation 제어를 실시하게 된다. 이 때, 실내 미세먼지 농도는 세 경우 모두 유사한 수준으로 실내 목표 농도를 만족시켰다. 실내 CO₂ 농도는 환기량이 적은 S1-C2(or S2-C2) 케이스에서 더 높았으나 역시 모든 케이스에서 실내 기준을 만족시켰다. 팬동력의 경우, S1-C2(or S2-C2) 케이스가 더 작았다. 이러한 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 더 작은 팬동력으로 실내 미세먼지와 실내 CO₂ 농도를 기준 이하로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.
- (6) 고성능 필터의 바이패스 유로를 설치한 개선된 시스템에 Condition 제어를 적용한 경우, 실외 미세먼지 농도가 높을 때, 기존 시스템에 Condition 제어를 적용한 경우 보다 실내 미세먼지 농도를 경감시키는데 효과가 있는 것으로 나타났다.

제 7 장 결 론

본 연구는 실내 미세먼지 관리를 위하여 실외 미세먼지 침투 및 실내 미세먼지 발생의 변화에 따라 달라지는 Ventilation과 Filtration 제어 효과를 예측하고, 에너지 소비 및 기타 실내 발생 오염물질의 관리를 고려하여 제어를 결정 할 수 있도록 최적 제어 알고리즘을 제안 하였다. 이를 위해 실내 미세먼지 관리를 위한 제어와 관련된 기존 연구를 고찰하여, 이론적 배경과 최적 제어 방향을 도출하였다. 다음으로 실내 미세먼지 농도 및 발생 예측 모델을 구축하여, 환경 조건과 제어 조건에 따른 실내 미세먼지 농도 특성을 검토하였다. 특성 분석 결과를 활용하여 CL 커브를 도출하고, 이를 바탕으로 환경 조건에 따라 실내 미세먼지 농도 및 에너지와 기타 실내 발생 오염물질을 고려한 Ventilation과 Filtration 최적 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 본 연구에서 제시한 실내 미세먼지 관리를 위한 Ventilation과 Filtration 최적 제어 적용 효과를 시뮬레이션을 통해 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 실내 미세먼지 농도 및 발생 예측을 위한 해석모델 구축

실외 미세먼지 침투와 실내 미세먼지 발생을 고려하여 Ventilation 제어 및 Filtration 제어가 실내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 침투와 발생의 영향 Ventilation 제어와 Filtration 제어의 영향을 해석할 수 있도록 관련 영향 인자를 도출하였다. 도출된 인자를 바탕으로 실내 미세먼지 농도해석과 실내 미세먼지 발생율을 예측할 수 있는 모델을 구축하고, 현장실험을 통해 검증하였다.

(2) 환경 조건과 제어 조건이 실내 농도에 미치는 영향 분석

실내 미세먼지 농도는 주어진 환경조건과 제어 가능한 시스템 조건에 따라 결정되기 때문에 영향인자를 환경조건 영향인자와 제어관련 영향인자로 분류하였다. 환경조건 영향인자 들을 대상으로 실내 농도에 대한 영향도 분석을 통해 영향이 큰 실외 미세먼지 농도와 실내 미세먼지 발생율을 주요 영향인자로 선정하고, 제어관련 영향인자인 환기량, 공기청정기 풍량, 환기 시스템 필터, 공기청정 시스템 필터와 함께 총 6개의 인자를 주요 영향인자로 결정하였다.

국내 공동주택 공간을 대상으로 제어를 하지 않은 상태에서, 실외 농도 조건과 실내 발생을 변화에 따른 실내 농도특성을 시뮬레이션 한 결과, 높은 기밀성능으로 인하여 침기율이 낮은 국내 공동주택의 실내 미세먼지 농도는 실외 농도 조건보다는 실내 발생 조건의 영향을 상대적으로 더 크게 받는 것으로 나타났다.

Ventilation의 풍량이 작으면, 필터효율 변화에 따른 실내 농도 변화가 크지 않은 것으로 나타났다. 풍량이 커질수록 실외 미세먼지 농도가 낮은 범위에서는 희석효과가 커 필터효율의 영향이 작았으나, 실외 미세먼지 농도가 높은 범위에서는 저효율 필터가 적용된 케이스의 경우, 실외 미세먼지 침투로 인하여 실내 농도가 급격히 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. 따라서 희석효과가 큰 환경조건을 판단하여 Ventilation 제어를 하는 것이 유리하며 실외 미세먼지 침투에 의한 실내 농도의 급격한 증가를 막기 위해서는 중효율 이상의 필터 적용이 바람직하다.

Filtration 풍량이 작으면 필터효율 변화에 따른 실내 농도 변화가 크지 않았고, 필터효율이 낮으면 풍량 변화에 따른 실내 농도 변화가 크지 않았다. 필터효율이 클수록 풍량 증가에 따른 실내 미세먼지 농도 개선 효과가 더 커지는 것으로 나타나 Filtration 제어를 위해서는 고효율 필터 적용이 요구된다.

(3) Ventilation & Filtration 최적 제어 알고리즘 도출

실외 미세먼지 침투 및 실내 미세먼지 발생의 변화에 따라 달라지는 Ventilation과 Filtration 제어 효과를 예측하고, 실내 미세먼지 목표 농도 이하 유지와 에너지 및 전반적인 실내공기질을 고려하여 시스템의 제어 모드와 제어량을 결정 할 수 있도록 최적 제어 알고리즘을 도출하였다.

4장의 환경조건 및 제어관련 인자에 따른 실내농도 특성 결과를 활용하여 Ventilation과 Filtration 제어 한계선(Control limit)과 제어 한계선에 의

해 구분되는 Condition zone의 정보를 포함하는 CL(Control limit) 커브(Fig 5.9)를 도출하고, CL 커브를 활용한 Condition zone 별 제어모드와 제어량 결정 방법을 제시하였다. Minimum ventilation limit 제어 한계선 이하의 Condition zone에 해당하는 Zone A와 B에서는 실에서 요구하는 최소 환기량으로 Ventilation 제어를 실시한다. Zone A의 경우, 환기량이 클수록 유리하나 최소 환기량으로도 실내 목표 농도 유지가 가능하므로 에너지를 고려하여 최소 환기량으로 제어하고, Zone B의 경우, 환기량이 작을수록 유리하나 기타 실내 발생 오염물질의 농도관리를 위해 최소 환기량을 확보하여 제어하도록 한다. Minimum ventilation limit 제어 한계선 초과, Ventilation control limit 제어 한계선 이하 영역에 해당하는 Zone C에서는 필요 풍량의 Ventilation 제어 또는 Filtration 제어 모두 가능하다. 여기서 필요 풍량이란 실내 목표 농도를 만족시키기 위해 요구되는 풍량을 의미한다. Zone C에서는 필요 환기량으로 Ventilation 제어하거나 최소 환기와 함께 필요 공기청정기 풍량으로 Filtration 제어하는 두가지 안 중에 에너지가 최소가 되는 안으로 결정하여 제어하도록 한다. Minimum ventilation limit 제어 한계선 초과, Ventilation control limit 제어 한계선 초과, 그리고 Filtration control limit with minimum ventilation 제어 한계선 이하 영역에 해당하는 Zone D에서는 Ventilation 제어로는 목표달성이 불가능하므로, 기타 실내 발생 오염물질 관리를 위한 최소 환기만 확보하고, 실내 목표 농도를 만족시키기 위해 필요한 공기청정기 풍량으로 Filtration 제어해야 한다. Filtration control limit with minimum ventilation 제어 한계선을 초과하는

영역인 Zone E는 적용된 시스템으로는 실내 목표 농도를 달성할 수 없는 환경조건이다. 이와 같은 환경조건에서는 최소 환기를 확보하고 최대 풍량으로 Filtration 제어하도록 한다.

(4) 최적 제어 알고리즘 적용효과 평가

본 연구를 통해 제안된 제어의 적용효과를 평가하기 위하여 기존 시스템에 기존 제어를 적용한 케이스와 Condition zone 제어를 적용한 케이스, 그리고 개선된 시스템에 Condition zone 제어를 적용한 케이스에 대하여 시뮬레이션을 통해 환경조건에 따라 각 케이스를 적용했을 때, 실내 미세먼지 농도, 실내 이산화탄소 농도, 팬동력을 비교하였다.

실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율도 높은 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 기존 제어 적용 시와 유사한 실내 미세먼지 농도를 유지하고 비슷한 팬동력을 사용하면서 기존 제어를 적용했을 때보다 실내에서 발생하는 오염물질에 관리에 유리하였다.

실외 미세먼지 농도가 높고, 실내 미세먼지 발생율은 낮은 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 기존 제어를 적용했을 때보다 상대적으로 실내 미세먼지 농도는 높았으나 미세먼지 실내 목표 농도 이하 유지 가능하였고, 실내에서 발생하는 오염물질 관리에 유리하며 팬동력을 적게 사용하였다.

실외 미세먼지 농도가 낮고, 실내 미세먼지 발생율은 높은 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 기존 제어 방식보다 팬동력은 상대적

으로 많이 사용하지만 실내 미세먼지 농도 경감에 유리하였다.

실외 미세먼지 농도가 낮고, 실내 미세먼지 발생율도 낮은 환경조건에서 Condition zone 제어를 할 경우, 기존 제어 방식 적용 시 보다 상대적으로 적은 팬동력으로 유사한 실내 미세먼지 농도 및 실내 이산화탄소 농도 수준을 유지할 수 있었다.

고성능 필터를 통과하는 환기가 가능한 바이패스 유로가 설치된 시스템에 Condition 제어를 적용시키면 기존 시스템에 Condition zone 제어를 적용한 경우에 비해 실외 미세먼지 농도가 높을 때, 실내 미세먼지 농도를 경감시키는데 일부 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 변화하는 실내외 미세먼지 환경에 대응한 실내 미세먼지 제어와 이 때 발생할 수 있는 기타 실내 발생 오염물질 농도 악화 문제 및 소비되는 에너지를 최적화 할 수 있는 Ventilation과 Filtration 제어 전략이 제시되었다. 아울러, 본 연구의 중간 결과물인 CL 커브의 경우, 일반적인 실내외 미세먼지 환경범위에서 실내 목표 농도를 만족시킬 수 있는 최대 풍량 결정에 활용할 수 있어 시스템 설계에도 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구의 진행 과정에서 나타난 한계점과 추후 연구 과제는 다음과 같다.

(1)본 연구에서는 실내 미세먼지 제어를 우선 목표로 하여 연구를 진행하였으며, 미세먼지 제어를 위해 환기량 감소시 기타 실내 발생 오염물질의 농도가 증가하는 것을 방지하기 위하여 실에서 요구하는 최소 환기량을 항상 확보하는 방안을 제시하였다. 이는 주로 거주자에 의해 발생하는 CO₂를 바탕으로 제시된 환기량 기준이므로, 기타 건축자재 등으로부터 주로 방출되는 VOCs 또는 HCHO 등의 다른 실내 발생 오염물질 관리는 발생 조건에 따라 최소 환기량 이상이 필요한 경우도 있을 수 있다. 본 연구에서는 고려하지 못하였지만, minimum control limit을 상향 조정하는 방안으로 고려가 가능할 것으로 판단된다.

(2)Ventilation과 Filtration 제어를 최적화 하기 위하여 팬동력에 의한 에너지를 비교하여 제어모드와 제어량을 결정하였다. 그러나, Ventilation 제어의 경우, 냉난방 기간에는 외기 도입에 의한 냉난방 에너지가 추가로 요구되며, 이는 팬동력보다 전체 에너지에 영향이 더 클 수 있다. 또한, 최적화를 에너지가 아닌 시스템 가동에 따른 전체비용으로 확장하면 필터 교체 비용 등의 고려도 필요하다. 이러한 에너지 또는 비용을 산출하는 부분의 연구가 추후 진행되면, Condition zone C의 Ventilation과 Filtration 제어의 결정을 위한 팬동력 비교를 보완된 추후 연구내용으로 대체하여 본 연구를 활용할 수 있다.

(3)본 연구는 환기로 인한 외기냉방 효과가 고려되지 못했다. 낮은 외기를 도입하여 실내의 온도를 낮춤으로서 쾌적을 높이고, 냉방 에너지를 절약할 수 있는 외기냉방의 경우, 환기로 인해 얻을 수 있는 이점이다. 이러한 외기냉방 효과가 고려되면, 추후 냉난방에너지의 비교까지 연구를 확장하였을 때, 냉난방에너지 측면에서 분리할 수 있는 환기를 좀더 적극적으로 활용할 수 있는 방안의 제시가 가능할 것이다.

(4)본 연구의 최종 결과물인 제어 알고리즘의 적용은 시간과 자원의 한계로 실험을 통한 검증은 실시하지 못하였다. 이에 따라 추후 검증 실험을 실시하여 보완할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- Afshari A, Matson U and Ekberg LE. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air* 2005;15:141–150.
- ANSI/ASHRAE Standard: 52.2-2012. Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size. American Society of Heating Refrigerating and, Air-Conditioning Engineers. 2012.
- ASHRAE. ASHRAE Handbook-fundamentals. Atlanta, GA, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2013:11.4.
- Brauer M, Hirtle R, Lang B, Ott W. Assessment of indoor fine aerosol contributions from environmental tobacco smoke and cooking with a portable nephelometer. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2000;10:136–144.
- Brook RD, Rajagopalan S, Pope CA, Brook JR, Bhatnagar A, Diez-Roux AV, Holguin F, Hong Y, Luepker RV, Mittleman MA, Peters A, Siscovick D, Smith SC, Whitsel L and Kaufman JD. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease An update to the scientific statement from the american heart association. *Circulation* 2010;121:2331–2378.
- BS EN 779:2012. Particulate air filters for general ventilation. Determination of the filtration performance. 2012.
- Canadian Council of Ministers of the Environment, CANADA-WIDE STANDARDS for PARTICULATE MATTER and OZONE, 2000.
- Chatoutsidou SE, Ondráček J, Tesar O, Tørseth K, Ždímal V, Lazaridis M. Indoor / outdoor particulate matter number and mass concentration in modern offices.

- Building and Environment. 2015;92:462–474.
- Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I / O ratio , in filtration factor and penetration factor. Atmospheric Environment. 2011;45:275–288.
- CSN EN 1822-1:2009. High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking. 2009.
- Du L, Batterman S, Parker E, Godwin C, Chin J, O’Toole A, Robins T, Brakefield-Caldwel W, Lewis T. Particle concentrations and effectiveness of free-standing air filters in bedrooms of children with asthma in Detroit, Michigan. Building and Environment. 2011;46:2303–2313.
- Ferro AR, Kopperud RJ, Hildemann LM. Source strengths for indoor human activities that resuspend particulate matter. Environmental Science & Technology. 2004;38:1759–1764.
- Fisk WJ, Faulkner D, Palonen J, Sepanen O. Performance and costs of particle air filtration technologies. Indoor air. 2002;12:223–234.
- Franck U, Odeh S, Wiedensohler A, Wehner B and Herbarth O. The effect of particle size on cardiovascular disorders — The smaller the worse. Sci. Total Environ. 2011;409:4217–4221.
- Guo H, Morawska L, He C, Zhang YL, Ayoko G, Cao M. Characterization of particle number concentrations and PM_{2.5} in a school: influence of outdoor air pollution on indoor air. Environmental science and pollution research international. 2010;17:1268–1278.
- Han KH, Zhang JS, Guo B. A novel approach of integrating ventilation and air cleaning for sustainable and healthy office environments. Energy & Buildings.

- 2014;76:32–42.
- Hänninen O, Asikainen A. Efficient reduction of indoor exposures indoor exposures; Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source controls. National Institute for Health and Welfare. 2013.
- He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmospheric Environment*. 2004;38:3405–3415.
- Hoek G, Krishnan RM, Beelen R, Peters A, Ostro B and Brunekreef B. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: a review. *Environ. Health*. 2013;12:43.
- Howard-Reed C, Wallace L, Emmerich S. Effect of ventilation systems and air filters on decay rates of particles produced by indoor sources in an occupied townhouse. *Atmospheric Environment*. 2003;37:5295-5306.
- Jamriska M, Morawska L, Ensor D. Control strategies for sub-micrometer particles indoors : model study of air filtration and ventilation. *Indoor air*. 2003;96–105.
- Jeng CJ, Kindzierski WB, Smith DW. Particle Penetration through Inclined and L - Shaped Cracks. 2007;133:331–339.
- Kim KH, Kabir E and Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ. Int*. 2015;74:136–143.
- Kleipis N, Ott W, Switzer P. A multiple smoker model for predicting indoor air quality in public lounges, *Environmental Science & Technology*. 1996;30:2813–2820.
- Liu DL, Nazaroff W. Modeling pollutant penetration across building envelopes. 2001;35:4451–4462.

- Liu H, Lee S, Kim M, Shi H, Tai J, Wasewar KL, et al. Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system. *Energy & Buildings*. 2013;66:553–561.
- Long CM, Suh HH and Koutrakis P. Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 2000;50:1236–1250.
- Long CM, Suh HH, Catalano PJ, Koutrakis P. Using time-and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior. *Environmental Science & Technology*. 2001;35:2089–2099.
- MacNeill M, Kearney J, Wallace L, Gibson M, Heroux ME, Kuchta J, Guernsey JR and Wheeler AJ. Quantifying the contribution of ambient and indoor-generated fine particles to indoor air in residential environments. *Indoor Air* 2014;24:362–375.
- Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons. 2013;233–292.
- Nazaroff W. Indoor particle dynamics. *Indoor air*. 2004;14:175–183.
- Nho-Kim EY, Michou M, Peuch V. Parameterization of size-dependent particle dry deposition velocities for global modeling. *Atmospheric Environment*. 2004;38:1933–1942.
- Novoselac A, Siegel J. Impact of placement of portable air cleaning devices in multizone residential environments. *Building and Environment*. 2009;44:2348–2356.
- Polidori A, Arhami M, Sioutas C, Delfino R, Allen R. Indoor/outdoor relationships, trends, and carbonaceous content of fine particulate matter in retirement homes

- of the Los Angeles Basin. Journal of the Air & Waste Management Association. 2012;57:336–379.
- Shah ASV, Lee KK, Mcallister DA, Hunter A, Nair H, Whiteley W, Langlish JP, Newby DE and Mills NL. Short term exposure to air pollution and stroke : systematic review and meta-analysis. Brit. Med. J. 2015;350:h1295.
- United States Environmental Protection Agency. Particulate matter (PM) Pollution. <https://www.epa.gov/pm-pollution> (accessed 20 December 2016).
- Urso P, Cattaneo A, Garramone G, Peruzzo C, Cavallo DM and Carrer P. Identification of particulate matter determinants in residential homes. Building and Environment. 2015;86:61–69.
- Wallace LA, Emmerich SJ, Howard-reed C. Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology. 2002;12:296–306.
- Wallace LA. Indoor particles: A review. J. Air Waste Manage. Assoc. 1996;46:98–126.
- Wallace LA. Indoor sources of ultrafine and accumulation mode particles: size distributions, size-resolved concentrations, and source strengths. Aerosol Sci. Technol. 2006;40:348–360.
- World Health Organization, WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide, 2005.
- Zhang L, He Z. Technical Note : An empirical algorithm estimating dry deposition velocity of fine, coarse and giant particles. Atmospheric Chemistry and Physics. 2014;14:3729–3737.

- Zhang Y. Indoor air quality engineering. CRC Press. 2004;280–285.
- Zhao B, Chen C, Yang X, Lai A. Comparison of three approaches to model particle penetration coefficient through a single straight crack in building envelopes. *Aerosol Science and Technology*. 2010;44:405–416.
- Zuraimi M, Nilsson G, Magee R. Removing indoor particles using portable air cleaners : Implications for residential infection transmission. *Building and Environment*. 2011;46:2512–2519.
- Zuraimi M, Tham K, Chew F, Ooi P. The effect of ventilation strategies of child care centers on indoor air quality and respiratory health of children in Singapore. *Indoor air*. 2007;317–327.
- 강공언, 김신도, 이정실, 최경순. 실내 공기질 관리학. 문운당. 2012;66–67.
- 국토교통부. 2017. 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 일부개정령안.
- 김신도 (2003), 미세먼지 규제와 영향, 공기청정기술, pp. 19–28.
- 김용표. 2006, 서울의 미세먼지에 의한 대기오염. *한국대기환경학회지*. 2006;22:535–553.
- 박성준. 영유아의 활동에 의한 보육실 미세먼지 발생 평가. *서울대학교*. 2016;15.
- 박영옥. 실내 생활공간에서의 미세먼지 오염 특성 및 제어기술. *한국생활환경학회지*. 2002;9:122–128.
- 박찬정. 공기청정기 시장 및 기술동향. *건축환경설비*. Vol.10 No.1. 2016;7-11.
- 배상환, 정민호. 공기청정 기능을 가지는 공동주택 환기시스템. *건축환경설비*. 2017;11:23–30.55.

- 신동천. 미세먼지의 건강영향. 대한의사협회지. 2007;175-182.
- 엄예슬, 강호빈, 최동희. 주거세대 내 재실행위가 실내 미세먼지 직경별 농도 상승에 미치는 영향. 2016 대한건축학회 추계학술발표대회논문집. 제36권 제2호. 2016; 1369-1370.
- 차동원. 실내공기오염. 기문당. 2007;81.
- 한국환경공단. Airkorea. www.airkorea.or.kr (accessed 11 September 2017).
- <http://www.environment.gov.au/protection/publications/factsheet-national-standards-criteria-air-pollutants-australia> 2005 (accessed 8 November 2017).
- <http://kjs.mep.gov.cn/hjbhzb/bzwb/dqhjbh/dqhjzlbz/201203/W020120410330232398521> (accessed 8 November 2017).
- <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed 8 November 2017).
- http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/air_quality_objectives/air_quality_objectives.html (accessed 8 November 2017).
- http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/PM2.5/index.html (accessed 8 November 2017).
- http://air.epa.gov.tw/Public/suspended_particles.aspx (accessed 8 November 2017).
- https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/standards/pm/s_pm_history.html (accessed 8 November 2017).